

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA**  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
**PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA EN ENERGÍA**



**UNS**  
**ESCUELA DE**  
**POSGRADO**

---

---

**Evaluación de proyectos fotovoltaicos en el Perú  
utilizando el Software Matlab y su  
kit de lógica difusa**

---

---

**Tesis para optar el Grado de  
Doctor en Ingeniería en Energía**

**Autor:**

**M.Sc. Díaz Chuque, José Luis**  
**DNI. N° 44236816**  
**Código ORCID: 0009-0002-5044-4761**

**Asesor:**

**Dr. Farfan Neyra, José Luis**  
**DNI. N° 17533891**  
**Código ORCID: 0000-0001-8394-205X**

**Línea de Investigación**  
**Energía Solar**

**NUEVO CHIMBOTE - PERÚ**  
**2024**



**UNS**  
ESCUELA DE  
POSGRADO

## CERTIFICACIÓN DEL ASESOR

Yo, **Dr. Farfán Neyra, José Luis**, por la presente certifico mi asesoramiento de la Tesis Doctoral titulado: **Evaluación de proyectos fotovoltaicos en el Perú utilizando el Software Matlab y su kit de lógica difusa** elaborado por el **M.Sc. Díaz Chuque, José Luis**, para obtener el grado de **Doctor en Ingeniería en Energía**, en la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Santa.

Nuevo Chimbote, abril del 2024

---

**Dr. Farfán Neyra, José Luis**  
**ASESOR**

**DNI N° 17533891**

**Código ORCID: 0000-0001-8394-205X**



**UNS**  
ESCUELA DE  
POSGRADO

**HOJA DEL AVAL DEL JURADO EVALUADOR**

**EVALUACIÓN DE PROYECTOS FOTOVOLTAICOS EN EL PERÚ  
UTILIZANDO EL SOFTWARE MATLAB Y SU KIT DE LÓGICA DIFUSA**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA EN ENERGÍA**

.....  
Dr. Morales Marchena, Herón Juan

PRESIDENTE

CODIGO ORCID: 000-0002-5394-0958

DNI N° 32837715

.....  
Dr. Paz Pérez, Edgar

SECRETARIO

CODIGO ORCID: 0009-0001-6853-8144

DNI N° 32978304

.....  
Dr. Farfan Neyra, José Luis

VOCAL

CODIGO ORCID: 0000-0001-8394-205X

DNI N° 17533891



**UNS**  
ESCUELA DE  
POSGRADO

## ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

A los diecinueve días del mes de abril del año 2024, siendo las 8:40 horas, en el aula P-02 de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Santa, se reunieron los miembros del Jurado Evaluador, designados mediante Resolución Directoral 133-2024-EPG-UNS de fecha 14.03.2024, conformado por los docentes: Dr. Herón Juan Morales Marchena (Presidente), Dr. Edgar Paz Pérez (Secretario), Dr. José Luis Farfan Neyra (Vocal); con la finalidad de evaluar la tesis titulada "EVALUACIÓN DE PROYECTOS FOTOVOLTAICOS EN EL PERÚ UTILIZANDO EL SOFTWARE MATLAB Y SU KIT DE LÓGICA DIFUSA", presentado por el tesista **José Luis Díaz Chuque**, egresado del programa de **Doctorado en Ingeniería en Energía**.

Sustentación autorizada mediante Resolución Directoral N° 204-2024-EPG-UNS de fecha 15 de abril de 2024.

El presidente del jurado autorizó el inicio del acto académico; producido y concluido el acto de sustentación de tesis, los miembros del jurado procedieron a la evaluación respectiva, haciendo una serie de preguntas y recomendaciones al tesista, quien dio respuestas a las interrogantes y observaciones.

El jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, declara la sustentación como A PROBADO, asignándole la calificación de 10.

Siendo las 11:00 horas del mismo día se da por finalizado el acto académico, firmando la presente acta en señal de conformidad.

Dr. Herón Juan Morales Marchena  
**PRESIDENTE**

Dr. Edgar Paz Pérez  
**SECRETARIO**

Dr. José Luis Farfan Neyra  
**VOCAL**

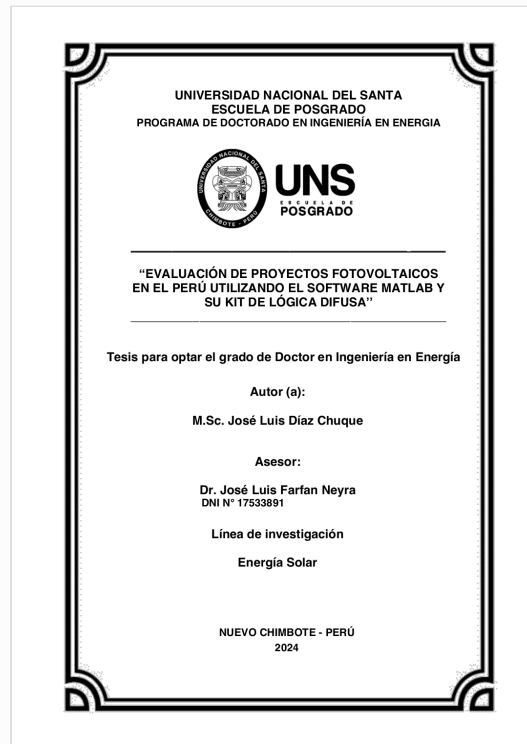


## Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Jose Luis Díaz Chuque  
Título del ejercicio: Quick Submit  
Título de la entrega: EVALUACIÓN DE PROYECTOS FOTOVOLTAICOS EN EL PERÚ U...  
Nombre del archivo: Tesis\_Final\_2024\_M.Sc.Ing.\_Jos\_Luis\_D\_az\_Chuque\_30.11.202...  
Tamaño del archivo: 5.55M  
Total páginas: 89  
Total de palabras: 14,653  
Total de caracteres: 82,085  
Fecha de entrega: 10-dic.-2024 11:23a. m. (UTC-0500)  
Identificador de la entre... 2547851863



# EVALUACIÓN DE PROYECTOS FOTOVOLTAICOS EN EL PERÚ UTILIZANDO EL SOFTWARE MATLAB Y SU KIT DE LÓGICA DIFUSA"

## INFORME DE ORIGINALIDAD

<b>17%</b>	<b>17%</b>	<b>4%</b>	<b>8%</b>
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

<b>1</b>	<b>riaa.uaem.mx:8080</b> Fuente de Internet	<b>7%</b>
<b>2</b>	<b>www.ing.unlp.edu.ar</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>3</b>	<b>riaa.uaem.mx</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>4</b>	<b>www2.osinergmin.gob.pe</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>5</b>	<b>vdocuments.com.br</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>6</b>	<b>hdl.handle.net</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>7</b>	<b>repositorio.uns.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>8</b>	<b>www.scielo.org.co</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>

# DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación a mi familia por el apoyo e inspiración, que han sido el motivo para lograr este objetivo.

# **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la vida y sobre todo por darme la oportunidad de dar un paso más en mi vida profesional.

Así mismo quiero expresar mi agradecimiento al Dr. José Luis Farfan Neyra por su apoyo incondicional durante todo el periodo de la elaboración de este trabajo de investigación.



# ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO.....	ii
ÍNDICE GENERAL.....	iii
LISTA DE CUADROS.....	vi
LISTA DE GRÁFICOS.....	vii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT.....	x
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1    Introducción.....	1
1.2    Planteamiento y fundamentación del problema de investigación.....	2
1.3    Formulación del problema de investigación.....	6
1.4    Objetivos de la investigación.....	6
1.4.1    Objetivo general.....	6
1.4.2    Objetivos específicos.....	7
1.5    Hipótesis de la investigación.....	7
1.6    Justificación e importancia.....	7
CAPÍTULO II.....	8
MARCO TEÓRICO.....	8
2.1    Antecedentes de la investigación.....	8
2.2    Marco conceptual.....	10
2.3    Fundamentos teóricos de la investigación.....	19
CAPÍTULO III.....	26
MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
3.1    Métodos de la investigación.....	26
3.2    Diseño o esquema de la investigación.....	28

3.3	Población y muestra .....	28
3.4	Variables e indicadores de la investigación .....	29
3.5	Actividades del proceso investigativo .....	29
3.5.1	Construcción del modelo.....	30
3.5.1.1	Radiación Solar .....	30
3.5.1.2	Costo de la Tecnología.....	33
3.5.1.2.1	Centrales Hidroeléctricas.....	34
3.5.1.2.2	Centrales Eólicas .....	34
3.5.1.2.3	Centrales Solares.....	35
3.5.1.2.4	Centrales Geotérmicas.....	35
3.5.1.2.5	Centrales Termoeléctricas .....	36
3.5.1.3	Costo de Operación y Mantenimiento .....	38
3.5.1.3.1	Centrales Hidroeléctricas.....	38
3.5.1.3.2	Centrales Eólicas .....	39
3.5.1.3.3	Centrales Solares.....	39
3.5.1.3.4	Centrales Geotérmicas.....	40
3.5.1.3.5	Centrales Termoeléctricas .....	40
3.5.1.4	Costo de Terreno.....	41
3.5.1.4	Costo del Petróleo .....	43
3.6	Técnicas e instrumentos de la investigación .....	44
3.7	Procedimiento para la recolección de datos.....	44
3.8	Técnicas de procesamiento y análisis de los datos.....	45
3.8.1	Desarrollo del modelo (Análisis de datos) .....	45
3.8.1.1	Definición de las funciones de membresía .....	46
3.8.1.2	Definición de las reglas .....	56

3.8.1.2 Validación de los proyectos.....	59
3.8.1.2.1 Caso de estudio del proyecto de la Central Solar Moquegua FV ....	59
3.8.1.2.2 Caso de estudio del proyecto de la Central Solar Rubí .....	62
CAPÍTULO IV .....	67
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	67
CAPÍTULO V .....	68
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	68
5.1 Conclusiones.....	68
5.2 Recomendaciones.....	69
CAPÍTULO VI.....	70
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y VIRTUALES.....	70
CAPÍTULO VII.....	78
ANEXOS .....	78

# LISTA DE CUADROS

<b>Tabla 1</b> Potencial Solar Nacional .....	32
<b>Tabla 2</b> Costo de la Tecnología .....	38
<b>Tabla 3</b> Resumen de Costos de Operación y Mantenimiento .....	41
<b>Tabla 4</b> Precios de Terreno por Metro Cuadrado.....	42
<b>Tabla 5</b> Precios Ponderados Publicados por Osinergmin (Actualizado al 30.09.2021) .....	43
<b>Tabla 6</b> Valores Límites de la Función de Membresía .....	46
<b>Tabla 7</b> Variables lingüísticas de entrada C.S Moquegua FV .....	60
<b>Tabla 8</b> Variables lingüísticas de entrada C.S Rubí.....	64

# LISTA DE GRÁFICOS

<b>Figura 1</b> Planteamiento de la Investigación .....	2
<b>Figura 2</b> Empleo de Subconjunto Borroso .....	14
<b>Figura 3</b> Formas de Membresía .....	15
<b>Figura 4</b> Componentes de una Función de Membresía.....	16
<b>Figura 5</b> Función Intersección: $C = A \cap B$ si y solo si .....	17
<b>Figura 6</b> Función de Unión: $C = \mu A \cup B$ si y solo si .....	17
<b>Figura 7</b> Función de complemento: $\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$ para $\bar{A} \subseteq X$ .....	18
<b>Figura 8</b> Sistema Experto Basado en la Lógica Difusa Aplicado a Proyectos Fotovoltaicos .....	27
<b>Figura 9</b> Árbol de Toma de Decisiones .....	29
<b>Figura 10</b> Mapa de Energía Solar Incidente Diaria Promedio Anual en el Perú ..	33
<b>Figura 11</b> Editor de Funciones de Membresía por Matlab .....	47
<b>Figura 12</b> Representación de la Variable Lingüística “Radiación Solar” en Matlab .....	48
<b>Figura 13</b> Representación de la Variable Lingüística “Costo de la Tecnología” en Matlab .....	49
<b>Figura 14</b> Representación de la Variable Lingüística “Costo de Operación y Mantenimiento” en Matlab .....	51
<b>Figura 15</b> Representación de la Variable Lingüística “Costo del Terreno” en Matlab .....	52
<b>Figura 16</b> Representación de la Variable Lingüística “Costo del Petróleo” en Matlab .....	54

<b>Figura 17</b> Representación de la Variable Lingüística “Recomendación de Inversión” en Matlab.....	55
<b>Figura 18</b> Algunas Reglas para Evaluar el Proyecto Fotovoltaico .....	57
<b>Figura 19</b> Aplicación de las reglas.....	58
<b>Figura 20</b> Central Solar Moquegua FV .....	60
<b>Figura 21</b> Aplicación de las reglas de la C.S Moquegua FV.....	61
<b>Figura 22</b> Resultado de la aplicación de las reglas de la C.S Moquegua FV .....	62
<b>Figura 23</b> Central Solar Rubí.....	63
<b>Figura 24</b> Aplicación de las reglas de la C.S Rubí.....	65
<b>Figura 25</b> Resultado de la aplicación de las reglas de la C.S Rubí .....	66

# RESUMEN

Desde sus inicios en la década del 60, la lógica difusa ha abierto la puerta de la comprensión de las computadoras, las máquinas y los sistemas basados en ellas. Originalmente se creó como un sistema de descripción del lenguaje, pero se ha convertido en una poderosa herramienta de control. Esta puede ser aplicada siempre que podamos definir unas variables lingüísticas de entrada (Radiación solar, costo de la tecnología, costo de operación y mantenimiento, Costo del terreno y Costo del petróleo) con sus valores y funciones de pertenencia y que, con el apoyo de un experto y una revisión bibliográfica extensa, se definirán las reglas de defuzzificación que nos permitirán obtener un sistema de inferencia difuso (FIS) óptimo.

Con este trabajo de investigación se abre camino a la evaluación de futuros nuevos proyectos fotovoltaicos en el Perú, con la finalidad de poder determinar si son viables o no.

Palabras clave: Lógica difusa, proyectos fotovoltaicos, variables lingüísticas, software Matlab.

# ABSTRACT

Since its inception in the 1960s, fuzzy logic has opened the door to understanding computers, machines, and systems based on them. It was originally created as a language description system, but it has evolved into a powerful control tool. This can be applied as long as we can define some linguistic input variables (Solar radiation, cost of technology, cost of operation and maintenance, and cost of land and cost of oil) with its values and functions of belonging and that, with the support of an expert and an extensive literature review, the rules of defuzzification will be defined that will allow us to obtain an optimal diffuse interference system (FIS).

This research work paves the way for the evaluation of future new photovoltaic projects in Peru, in order to determine whether they are viable or not.

Keywords: Fuzzy logic, photovoltaic projects, Linguistic variables, Matlab software.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Introducción

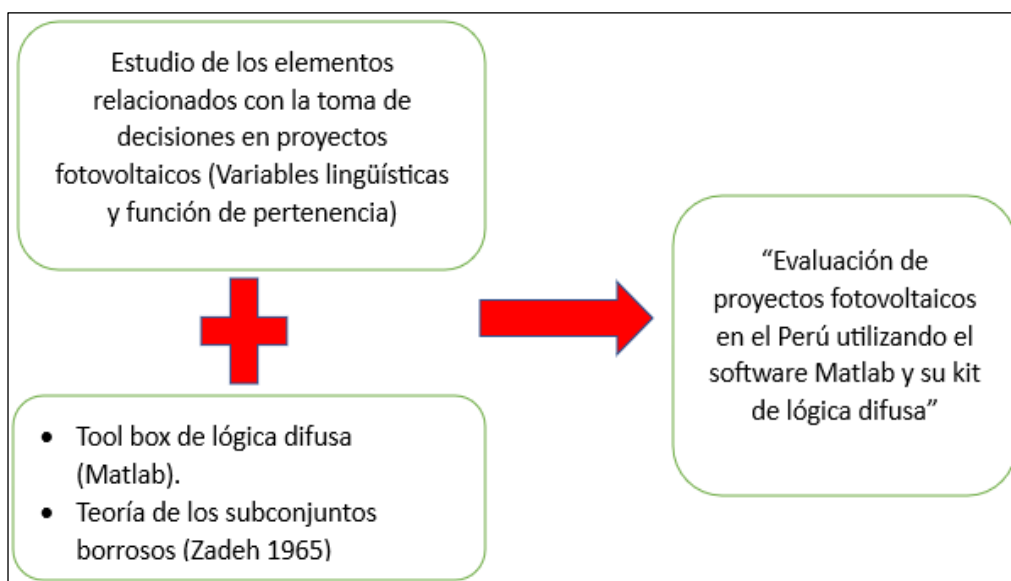
El trabajo de investigación que se planteó para el desarrollo de la tesis del doctorado en ingeniería en energía, se basa en la aplicación de un sistema de inferencia difuso (FIS), basado en el Matlab y su kit de lógica difusa, y que a través de unas variables lingüísticas de entrada (radiación solar, costo de la tecnología, costo de operación y mantenimiento, costo del terreno y costo del petróleo), que apoyados en una profunda revisión bibliográfica, nos permiten tomar decisiones en cuanto a que si un proyecto fotovoltaico es viable o no.

Todos los cálculos fueron realizados con la herramienta de Matlab y su kit toolbox de lógica difusa. Una vez realizado este modelo difuso ya se puede evaluar proyectos fotovoltaicos existentes y por lo tanto podemos ver si realmente es viable o no dicho proyecto; así mismo, se podrá determinar si los futuros proyectos fotovoltaicos a construir en nuestro país serán viables o no.

En la siguiente figura, se tiene el planteamiento de la investigación que se ha llevado a cabo.

## Figura 1

### Planteamiento de la Investigación



Fuente: Modificado de (Román, 2018).

En el Perú, el 54,25% de la energía total proviene de las centrales termoeléctricas, el 39,78% de las centrales hidroeléctricas, el 3,25% de las centrales eólicas, el 0,48% de las centrales de biomasa y solo el 2,25% de las centrales solares (Osinergmin, 2021), por esta razón se hace necesario que el estado peruano y la empresa privada sigan impulsando e incentivando de manera adecuada la generación fotovoltaica a gran escala y que estos proyectos puedan ser evaluados previamente. Uno de los métodos para evaluar dichos proyectos, con la finalidad de determinar si su inversión es confiable (viable) o no, es a través del sistema de inferencia difuso (FIS), basado en la lógica difusa (Toolbox Fuzzy) del software Matlab.

## 1.2 Planteamiento y fundamentación del problema de investigación

Uno de los mayores desafíos del mundo es satisfacer la creciente demanda de energía eléctrica y hacerla sostenible en el tiempo. Hoy en día, el 81.3% de la energía total proviene de los combustibles fósiles. El problema de este tipo de energía no solo está relacionado con la escasez de materia prima y su

relación directa con el calentamiento global, sino también con la contaminación del aire, la generación de la lluvia ácida, la destrucción de la capa de ozono y la devastación de áreas forestales. Por lo tanto, el incremento de las fuentes de energía renovable se ha vuelto cada vez más importante, toda vez que en la actualidad solo el 2% de la energía total proviene de las energías renovables (solar, eólica, marítima, etc.) (International Energy Agency, 2020).

Para el año 2040, la demanda energética global total aumentará en un 30%, así mismo la gran parte de este consumo provendrá de los países en vías de desarrollo. También se espera que el 37% de la producción de electricidad provenga de fuentes renovables, específicamente, la generación solar y eólica. Hoy en día, alrededor del 23% del consumo eléctrico mundial se genera a partir de este tipo de fuentes. Hasta cierto punto, el mayor uso de estas tecnologías puede atribuirse a su mayor competitividad y a la entrada en vigor del Acuerdo de París en el año 2016. Las economías mundiales dependerán menos de los combustibles fósiles, tales como el petróleo y el carbono, y elegirán fuentes más limpias y eficientes. En particular, se espera que el consumo del gas natural continúe creciendo hasta en un 50% en los futuros años, con la finalidad de que se posicione por encima del carbón en el consumo energético global (Simons, 2017).

La energía cumple un papel primordial en el desarrollo mundial, el cual ahora está controlado por los combustibles fósiles (petróleo y carbón), los cuales son usados para generar la energía eléctrica. Pero, el calentamiento global debido al alto consumo de estos combustibles se ha transformado en un fenómeno mayor. Para contrarrestarlo, se debe generar energía renovable, amigable con el medio ambiente y cada vez más accesible debido a la evolución de la tecnología y la competencia en el mercado. Así mismo, se ha demostrado que las energías renovables reducen la pobreza y brindan oportunidades comerciales y laborales en los países desarrollados; No obstante, se ha demostrado que se usa de manera intermitente y no es confiable. Por ello, se han desarrollado diferentes metodologías, técnicas y tecnologías, con la

finalidad de que puedan proporcionar la máxima fiabilidad y eficiencia para la producción de energía renovable. De estos métodos sobresale la Lógica Difusa, que permite conceptualizar la indefinición de un sistema en un único parámetro cuantitativo, ya que se trata de una inferencia aproximada que también tiene “validez lingüística” en reemplazo de valores explícitos nítidos. La lógica difusa se ocupa de la noción de “valor de verdad” que se encuentra entre valores típicos de la lógica clásica (Blancas, 2019).

En los últimos años, la energía eólica y solar fotovoltaica, han madurado completamente y han experimentado (y seguirán experimentando) reducciones de costos impactantes. Desde los años 2009-2019, el costo de la generación de energía solar fotovoltaica se redujo en un 82%, mientras que para la energía eólica se redujo en un 39%. La reducción de costos continuará y nada nos hace pensar que esta tendencia se detendrá. La energía eólica y solar, son el abastecimiento de energía más baratas para dos tercios de los habitantes de este mundo y muy pronto estarán disponibles para todos (Fresco, 2021).

La energía solar se transformará en el nuevo líder del mercado eléctrico mundial. Con los parámetros políticos vigentes, está en trayecto establecer nuevos récords de desempeño cada año después de 2022. Si los Gobiernos e inversionistas redoblan sus esfuerzos de energía limpia alineada con el escenario de sostenibilidad, el auge energético tendrá un gran crecimiento, ya que la energía solar y la eólica serían más alentadores para enfrentar el cambio climático mundial (Biroi, 2020).

La fuente de energía proveniente del sol es una de las alternativas energéticas que se viene desarrollando para reemplazar el uso de los combustibles fósiles. El Perú está más cerca de Ecuador, donde hay sol en casi todo el año. De acuerdo al Atlas Solar Peruano, elaborado por el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), la radiación solar anual del Perú es muy alta, siendo alrededor de 5,5 a 6,5 kWh/m<sup>2</sup>, 5,0 a 6,0 kWh/m<sup>2</sup> y 4,5 a 5,0 kWh/m<sup>2</sup>, respectivamente en la sierra, costa y selva (PUCP, 2017).

En el Perú, el 54,25% de la energía total proviene de las centrales termoeléctricas, el 39,78% de las centrales hidroeléctricas, el 3,25% de las centrales eólicas, el 0,48% de las centrales de biomasa y el 2,25% de las centrales solares (las cuales son 07 e integran el Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional -COES) (Osinergmin, 2021). La central solar más grande del Perú es la “C.S Rubí”, ubicada en el Departamento de Moquegua y cuenta con una potencia instalada nominal de 144,5 MW.

La principal fuente de energía renovable del país es la energía hidroeléctrica, seguida de la energía solar, con una potencia total de 69 445 MW y 25 000 MW, respectivamente. El Perú tiene una gran envergadura de generación de energía renovable, pero rara vez se utiliza. El documento del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) “Elaboración de la nueva matriz energética sostenible y evaluación ambiental estratégica como instrumentos de planificación”, introduce el Plan de Desarrollo de los Recursos Energéticos Renovables (RER) 2012-2040. En los resultados, se estima que la potencia total instalada alcanzará los 24 976,9 MW para el 2040, de los cuales las centrales RER participantes serán de 4 321 MW (17,3% del total). Para lograr esta capacidad, se requerirá una inversión de aproximadamente US\$ 8 757 millones. Este es un gran desafío para el marco regulatorio, ya que se deberá de promover un gran auge en la instalación de los RER (Osinergmin, 2019).

En el Perú, se han realizado 04 subastas on-grid, las cuales fueron realizadas en los años 2009, 2011, 2013 y 2015, respectivamente, y 01 subasta off-grid, la cual fue realizada en el año 2013, que permitieron diversificar nuestra matriz energética. Adicional a ello, el gobierno actual deja al próximo gobierno 15 proyectos de generación de recursos energéticos renovables (RER) en diversos departamentos del país, con un financiamiento de US\$ 1 319 millones y que representará una potencia instalada de 1 208 MW. Así mismo, todos estos proyectos cuentan con concesiones definitivas y se espera que entren en operación entre los años 2022 y 2024, entregando energía de calidad y limpia al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN). El

principal proyecto de energía solar es la Central Solar Fotovoltaica llamada Continua Misti, la cual está ubicada en el Departamento de Arequipa, con un financiamiento superior a los US\$ 210 millones y una potencia instalada de 300 MW. En el ámbito de la electrificación rural, hoy en día el MINEM cuenta con 9 proyectos de centrales eléctricas con sistemas fotovoltaicos en los Departamentos de Amazonas, Loreto y Ucayali. Dos de estos están en la fase de licitación y los restantes se espera sean licitados a fines de este año. Los habitantes beneficiados superan los 52 000 peruanos, con un financiamiento total de más de S/ 270 millones, también deja orientado el Segundo Programa Masivo con sistemas de energía fotovoltaica, en mejora de 107 mil viviendas rurales que se encuentran en lugares agrestes que carecen del servicio de electricidad y que, por su ubicación, son probablemente sensibles de ser electrificadas a través de los paneles solares (Gálvez, 2021).

Por esta razón se hace necesario que el estado peruano y la empresa privada sigan impulsando e incentivando de manera adecuada la generación fotovoltaica a gran escala y que estos proyectos puedan ser evaluados previamente. Uno de los métodos para evaluar dichos proyectos, con la finalidad de determinar si su inversión es confiable (viable) o no, es a través del sistema de inferencia difuso (FIS), basado en la lógica difusa (Toolbox Fuzzy) del software Matlab.

### **1.3 Formulación del problema de investigación**

¿Es posible evaluar proyectos fotovoltaicos en el Perú y obtener un indicador viable utilizando el software Matlab con su kit de la lógica difusa y un sistema de inferencia difuso (FIS)?

### **1.4 Objetivos de la investigación**

#### **1.4.1 Objetivo general**

Establecer un sistema de inferencia difuso (FIS) para evaluar proyectos fotovoltaicos en el Perú y su viabilidad, utilizando el software Matlab y su kit de lógica difusa.

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Determinar los valores de las variables lingüísticas de entrada que serán utilizadas en la evaluación de los proyectos fotovoltaicos.
- Establecer una metodología que permita evaluar proyectos fotovoltaicos.
- Validar y mostrar la utilidad del modelo de sistema de inferencia difuso (FIS), con proyectos fotovoltaicos realizados en nuestro país.

#### **1.5 Hipótesis de la investigación**

Mediante el uso del software Matlab con su kit de lógica difusa y un sistema de inferencia difuso (FIS), se puede evaluar proyectos fotovoltaicos en el Perú y obtener un indicador viable.

#### **1.6 Justificación e importancia**

Ante los cambios tecnológicos que se viene dando a nivel mundial, es primordial encontrar formas que apoyen a los empresarios y/o gobiernos en la toma de decisiones, especialmente en entornos inciertos. Los programas que generan tareas iguales son muy complejos y usan modelos matemáticos que son difíciles de entender. El sistema de inferencia difuso (FIS) utiliza términos que son más familiares y próximos a los humanos, sin reducir la precisión de los resultados, motivo por el cual, en el presente estudio de investigación se aplicó la lógica difusa en la evaluación de los proyectos fotovoltaicos, estudiando las variables de entrada básicas que intervienen en la toma de decisiones, con la finalidad de determinar si estos proyectos son viables o no.

# CAPÍTULO II

## MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes de la investigación

Entre las fuentes de energía renovable existentes, la energía solar fotovoltaica se distingue por su rápido crecimiento y aceptación mundial; sin embargo, los sistemas fotovoltaicos tienen baja eficiencia y su desempeño está relacionado con varios factores, como la temperatura, irradiancia, ángulo del panel, entre otros. Por lo tanto, la implementación y operación eficiente de los generadores fotovoltaicos requieren el uso de un sistema de seguimiento de transferencia máxima de poder – MPPT. El sistema de inferencia difuso (FIS) de la herramienta Matlab tiene como ventaja la rápida respuesta a las variaciones en las condiciones del sistema y la no necesidad de un modelado matemático, como ocurre con otros métodos. Los resultados de las simulaciones indican que el sistema de inferencia difuso (FIS) opera eficientemente en el mantenimiento de la generación de máxima potencia por parte del sistema (Vargas, et al., 2019).

La utilización de un sistema de inferencia difuso (FIS), mediante la lógica difusa, puede facilitar el proceso de toma de decisiones en la realización de proyectos solares fotovoltaicos. La lógica difusa es una herramienta útil para tomar decisiones y conocer si un proyecto de fotovoltaico es factible. Una vez finalizado el programa, creemos que cualquier persona puede utilizar fácilmente esta herramienta, sin un alto nivel de experiencia, permitiendo la evaluación de proyectos solares fotovoltaicos en diferentes lugares y por diferentes personas con igual razonamiento. Una herramienta como esta puede ser muy útil para las diversas organizaciones a nivel mundial (Román, 2018).

Las técnicas de Soft Computing se han empleado con éxito en múltiples aplicaciones actuales; uno de las más exitosas es la lógica difusa, la cual se



propone como una aproximación alternativa a la teoría de la probabilidad para cuantificar decisiones y asumir riesgos, a diferencia de las herramientas existentes que se caracterizan por la aproximación, vaguedad y la incertidumbre. El uso de la lógica difusa es aconsejable cuando se tienen sistemas altamente complejos o cuando se desconocen los modelos matemáticos que los describen y al mismo tiempo cuando se cuenta con la experiencia de un experto que logra controlar con éxito el sistema, es decir, introduce una subjetividad inherente a la actividad humana en un procedimiento automatizado. Así, la lógica difusa emula una de las características inteligentes de los humanos, razonando bajo incertidumbre. Además, es recomendable utilizar esta herramienta cuando algunas partes del sistema a controlar no son conocidas y no pueden medirse de manera confiable y cuando el ajuste de una variable podría generar un desajuste de otras variables, con ello se permitirá tomar decisiones sobre si es conveniente o no realizar un proyecto de energía renovable (Seuret, et al., 2016).

El modelado difuso integrado con series de tiempo, ARMA, regresión y redes neuronales, ha ayudado a mejorar la precisión de la predicción de las variables en cuestión. Fuzzy AHP y fuzzy ANP habían ayudado a identificar la importancia relativa de varias alternativas, esquemas y planes de proyectos de energía renovable. La confusión incorporada en los modelos ayuda a capturar el razonamiento heurístico que ocurre en las mentes humanas. GA, NN, DEA, PSO, TOPSIS, VIKOR, optimización de cuco, optimización de abejas melíferas, etc. de base difusa, aunque son técnicas complejas muy avanzadas, ha hecho que estas técnicas sean muy fáciles de usar y simples debido a la capacidad informática que tienen. Si bien la complejidad aumenta cuando se introduce el difuso, sin embargo, se encuentra que los resultados obtenidos con estos modelos justifican la complejidad de las técnicas. El funcionamiento y el rendimiento de los modelos basados en la lógica difusa en los sistemas de energía renovable se han mejorado en numerosos casos, ya sea en la perfección de la energía, la velocidad variable, la elección del sitio o el control de la temperatura. La revisión destaca claramente que existe un amplio margen para la investigación en modelos basados en difusos en

sistemas de energía renovable. Los investigadores pueden adoptar modelos basados en difusos para enriquecer su investigación y llegar a soluciones pragmáticas que resuelvan la preocupación por la energía y el medio ambiente (Suganthi, Iniyan, & Samuel, 2015).

La gestión de la energía mediante técnicas informáticas, como es el caso de la lógica difusa, es muy realista con el carácter difuso de las variables alternativas, demostrando así la utilidad de este sistema para este tipo de escenarios. Puede predecir y distinguir qué fuentes son las más adecuadas para satisfacer la demanda de electricidad en un momento dado y en determinadas circunstancias. Este modelo de gestión aumenta la eficiencia de un sistema dado y, por lo tanto, permite seleccionar cada subsistema, respetando el costo, la confiabilidad y las prioridades (Ledesma, 2011).

Es sesgado argumentar que predecir el futuro del tiempo es la forma más económica de construir un sistema eficaz y eficiente. La inversión en equipos para la construcción de un sistema de energía renovable se puede medir desde el momento en que se tiene una herramienta capaz de proyectar el nivel de economía en el que debe operar el sistema en su conjunto. La lógica difusa encaja perfectamente, ya que esto está diseñado con la intención de operar con información imprecisa, teniendo esta lógica el poder de minimizar los efectos de los errores en la información de entrada. Un error en la previsión meteorológica, así como una variación en la medición de la carga de la batería, no afectarán los datos de salida del sistema de forma que comprometan el control (Posselt, Molz, & Horn, 2009).

## **2.2 Marco conceptual**

### **Energía Renovable**

Es cualquier modo de energía de origen solar, geofísico o biológico que se regenera por procesos naturales. Deriva de los flujos de energía continuos o repetitivos que ocurren en el medio natural e incluye tecnologías bajas en

carbón, como la hidroeléctrica, eólica, solar, mareomotriz, y la energía térmica oceánica (IICA, 2015).

## **Energía Solar**

“Es una energía renovable obtenida de las ondas electromagnéticas del sol y que proviene de un recurso natural e inagotable, en este caso el sol” (Factorenergía, 2023).

Es una forma de energía renovable que se logra al capturar la radiación electromagnética del sol. Puede generar electricidad o provocar reacciones químicas. Los sistemas de colectores solares se clasifican en dos grupos: pasivos y activos. Los pasivos no necesitan de un colector solar, esto es posible a través de la aplicación de elementos arquitectónicos bioclimáticos que tienen una estrecha relación con el sol, capaces de difundir la luz. Por el contrario, los sistemas activos utilizan equipos para captar la radiación, tales como los colectores solares o los paneles fotovoltaicos (Osinergmin, 2019).

## **Radiación solar**

“Es un fenómeno fundamental en el campo de las ciencias naturales y la astronomía, es la emisión de energía electromagnética del sol, que se irradia al espacio y llega a la tierra” (Nehuén, 2023).

## **Proyectos Fotovoltaicos**

Son sistemas de generación de energía solar que depende de muchas variables, como la radiación solar, meteorología, temperatura y fuerza del viento; de las condiciones topográficas y ambientales del lugar, como la presencia de polvo y sombras dispersas en el aire; y de las especificaciones del proyecto, es decir, de la disposición (nivel de inclinación y tipo de monitorización) y la eficiencia de los distintos componentes (paneles, transformadores, etc.) (chicaguala, 2017).

## **Combustibles Fósiles**

“Son fuentes de energía que resultan de la descomposición de la materia orgánica de animales, plantas y microorganismos, y el proceso de conversión lleva millones de años. Se dividen en tres categorías: petróleo, carbón y gas natural” (BBVA, 2022).

## **Software Matlab**

“Es una plataforma de programación y cálculo en forma de software orientado a tareas de ingeniería y matemáticas” (Llamas, 2023).

Así mismo, “Incluye un conjunto de funciones que se pueden utilizar para resolver problemas comunes, pero Matlab también integra otras bibliotecas especializadas diseñadas para resolver problemas comunes y temas muy específicos” (Alarcón, Lugo, & Maldonado, 2011).

## **Lógica Difusa**

Es el estudio de principios formales de razonamiento aproximado, a diferencia de las lógicas clásicas, que solo definen la relevancia y no relevancia de un elemento en un conjunto. La lógica difusa es capaz no solo de identificar esta pertenencia y no relevancia, sino también la existencia de valores intermedios entre estos dos conjuntos (Leoti & Mollo, 2016).

## **Sistema Experto**

Es un programa informático basado en el conocimiento creado por un experto humano que imita el comportamiento humano usando la información proporcionada para formarse una opinión sobre un tema en particular y es esencial para resolver los problemas resultantes. El diseño de un sistema experto se lleva a cabo mediante la transmisión de principios científicos,

información técnica e imaginación a las máquinas para realizar funciones específicas con la máxima eficiencia (Razo, 2019).

### **Variables Lingüísticas**

Son aquellas cuyos valores son palabras en un lenguaje artificial o natural. De este modo, se utiliza una variable lingüística para representar cualquier cosa que sea demasiado compleja o para la que no tengamos una definición específica; es decir, lo que no podemos describir con números (Cabrera, Ortiz, & Cruz, 2019).

De esta forma, las variables del lenguaje se pueden utilizar para representar cualquier elemento que sea demasiado complejo o para el que tengamos una definición concreta; es decir, algo que no podemos describir numéricamente. Una variable lingüística tiene 5 propiedades ( $x$ ,  $X$ ,  $T(x)$ ,  $G$ ,  $M$ ).

$x$  es nombre de la variable.

$X$  es el universo del discurso.

$T(x)$  son los valores lingüísticos que acepta la variable.

$G$  es la regla sintáctica que genera los valores lingüísticos.

$M$  es la regla semántica que asocia cada término lingüístico de  $X$  con su significado (Román, 2018).

### **Conjunto Borroso**

Es una extensión de los conjuntos clásicos que agregan funciones de pertenencia definidas como números reales entre 0 y 1. Esto se asocia a un valor lingüístico específico, definido por una palabra o una etiqueta lingüística que es el nombre del conjunto o subconjunto. Para cada conjunto se define una función de pertenencia o de membresía denominada  $\mu_A(x)$ , la cual indica el grado en que la variable  $X$  está incluida en el concepto representado por la etiqueta  $A$  ( $0 \leq \mu_A(x) \leq 1$ ). Si esta función toma el valor 0 significa que tal valor de  $x$  no está incluido en  $A$  y si toma el valor 1 significa que tal valor de  $x$  está absolutamente incluido en  $A$ . En la siguiente figura se puede ver un ejemplo

donde el conjunto velocidad (con variable  $x$ ) está subdividido en 3 subconjuntos {Baja, Meda, Alta}, con sus respectivas funciones de membresía  $\{\mu_{Baja}(x) \mu_{Media}(x) \mu_{Alta}(x)\}$ .

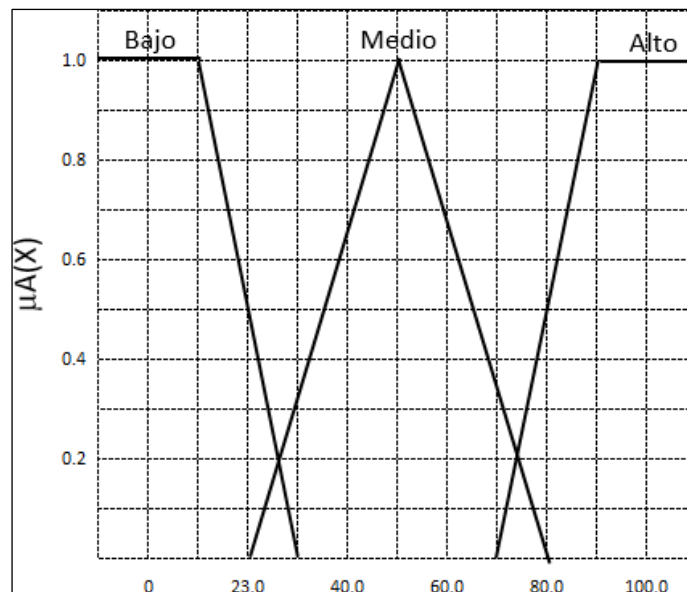
Sea  $X$  una colección de objetos, expresados en forma genérica por  $x$ . Entonces, un conjunto difuso  $A$  en  $X$ , se define como un conjunto de pares ordenados.

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in X\}$$

Donde  $\mu_A(x)$  es una función de pertenencia cuya etiqueta es  $A$  y su dominio es  $x$ .

## Figura 2

*Empleo de Subconjunto Borroso*



Fuente: (Román, 2018).

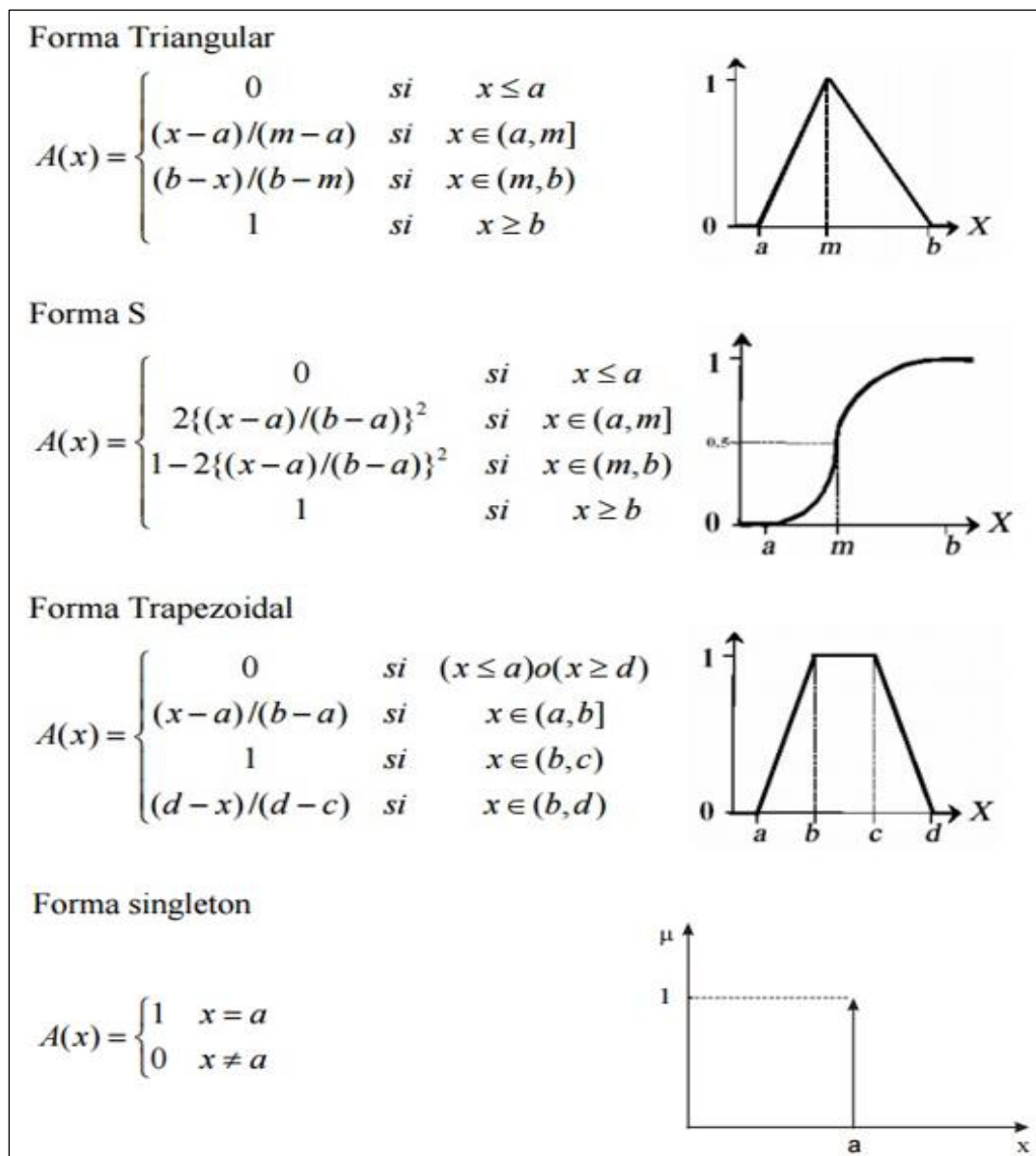
## Función de membresía

Representan el grado de pertenencia al subconjunto definido por la etiqueta.

Hay muchos tipos de funciones de pertenencia. Las más comunes son las siguientes: trapezoidales, triangulares, sólidas y en forma de S.

**Figura 3**

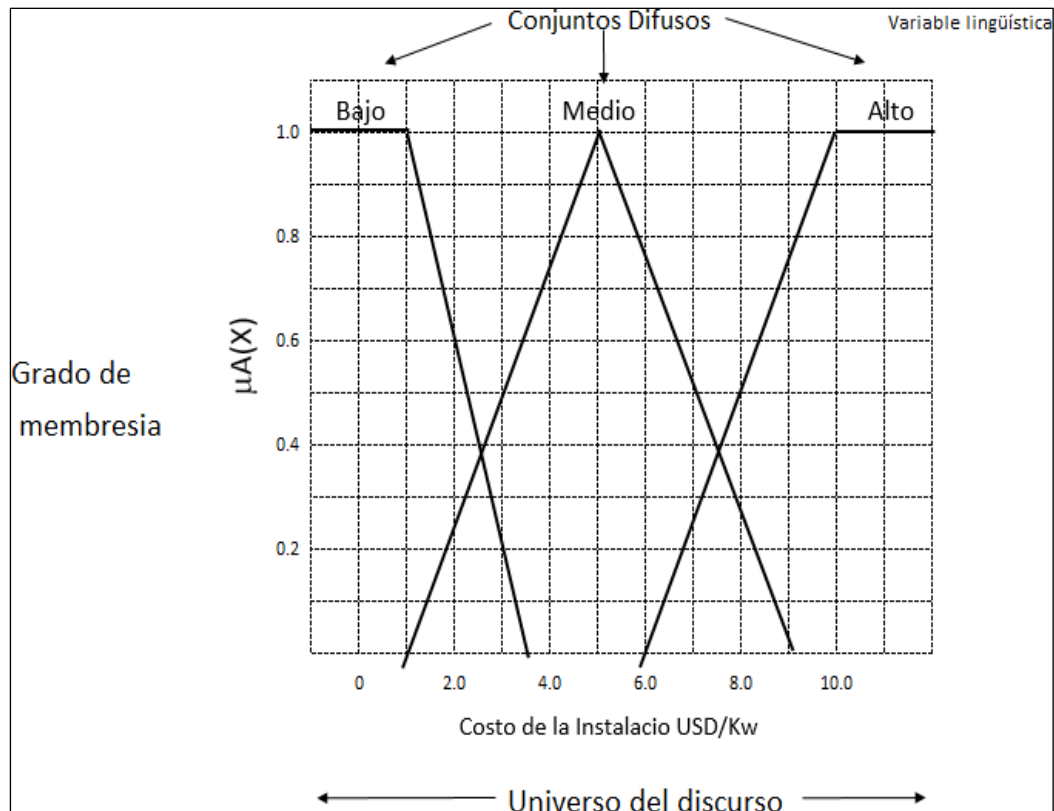
*Formas de Membresía*



Fuente: (Román, 2018).

**Figura 4**

*Componentes de una Función de Membresía*



Fuente: (Román, 2018).

### Operaciones Borrosas

Son generalizaciones de las operaciones de los conjuntos clásicos.

- Se definen a continuación 3 operaciones básicas a realizar sobre conjuntos, estas operaciones son complemento, unión e intersección. Sean las etiquetas A y B las que identifican a dos conjuntos borrosos asociados a una variable lingüística x, las operaciones se definen como:

Complemento  $\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x)$

Unión: Operador lógico OR (max.)  $\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$

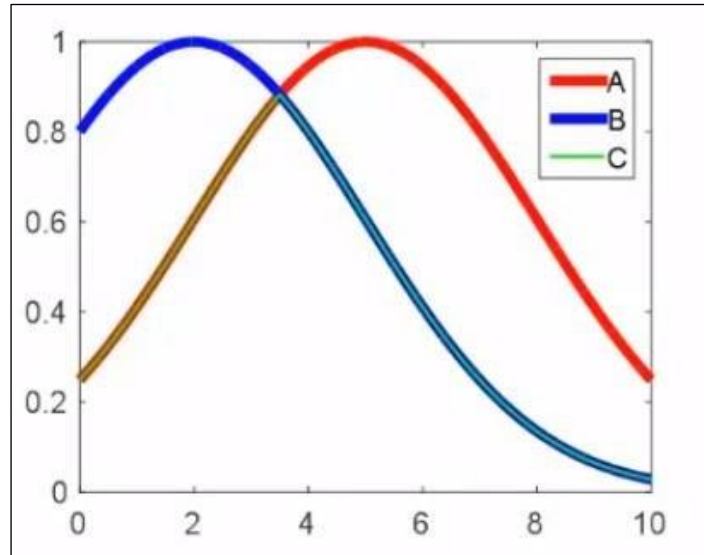
Intersección: Operador lógico AND (min)  $\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$



**Figura 5**

*Función Intersección:  $C = A \cap B$  si y solo si*

$$\mu_c(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \text{ para } \tilde{A} \times \mathcal{E} X$$

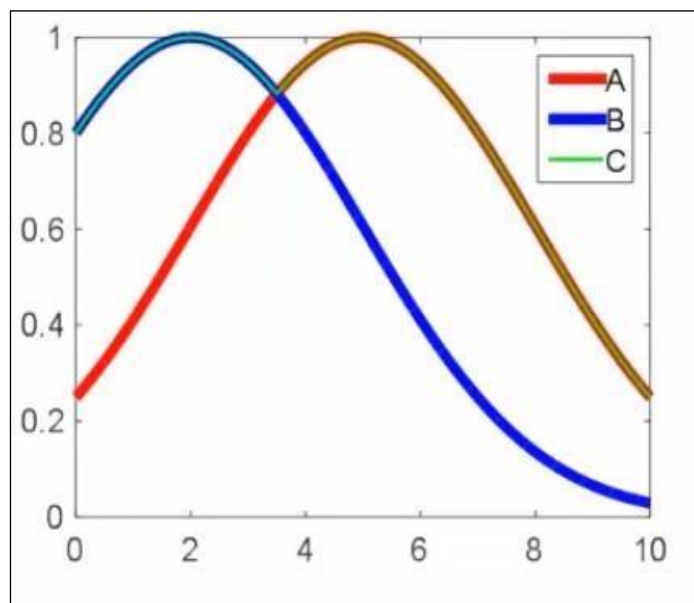


Fuente: (Zadeh, 1965)

**Figura 6**

*Función de Unión:  $C = \mu A \cup B$  si y solo si*

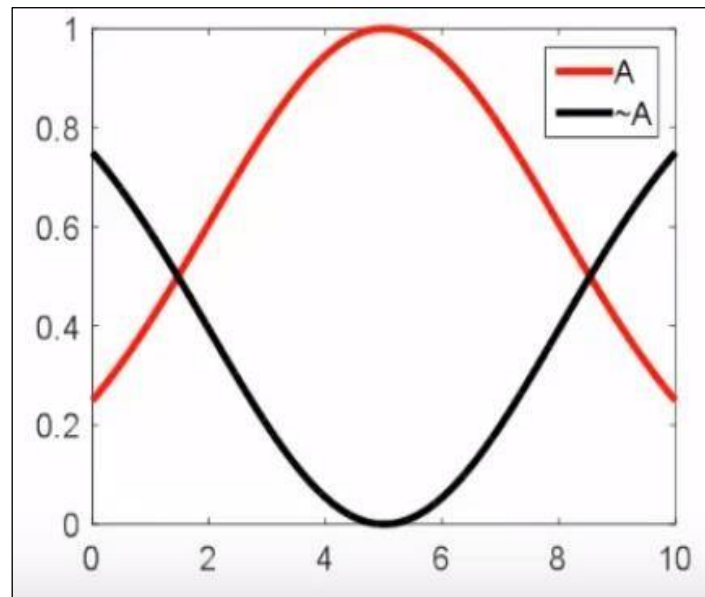
$$\mu_c(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \text{ para } \tilde{A} \times \mathcal{E} X$$



Fuente: (Zadeh, 1965)

## Figura 7

*Función de complemento:  $\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$  para  $\bar{A} \in \mathcal{E}_X$*



Fuente: (Zadeh, 1965)

## Reglas Borrosas

Son proposiciones que nos permiten expresar el conocimiento disponible sobre la relación entre antecedentes y efectos. Expresar adecuadamente este conocimiento generalmente requiere de varias reglas que se combinan para formar una base de reglas, la cual permite definir cómo funciona el sistema de inferencia difuso (FIS), donde reside el conocimiento en la simulación y la correspondiente estrategia de control (Román, 2018).

## Fuzzificación

“Es aquel proceso encargado de transformar los valores de entradas en variables lingüísticas y clasificarlas según su valor de pertenencia; así mismo existen dos métodos de Fuzzificación, los cuales son Singleton y No Singleton” (Cordero, 2019).

## **Defuzzificación**

Es un proceso matemático que se utiliza para convertir conjuntos difusos en números reales. El procedimiento de inferencia difusa hace inferencias a partir de la información de entrada, pero de forma difusa. Esta inferencia, o salida difusa, se obtiene de la etapa de inferencia difusa, que genera el conjunto borroso, pero los datos de salida del sistema deben ser reales y reflejar la cantidad obtenida en la etapa de síntesis. Utilizando el método de defuzzificación del centroide, la salida difusa se transforma en un número real, es decir, el conjunto de coordenadas "x" de la salida difusa (Román, 2018).

### **2.3 Fundamentos teóricos de la investigación**

#### **Energía Renovable**

Las energías renovables se caracterizan por ser no contaminantes y no contribuir al efecto invernadero. En el caso de la energía proveniente de la biomasa, se cree que, si bien en su producción puede ser contaminante, también reducen la contaminación ocasionada por los insumos contaminantes que consumen, por lo que generalmente sus efectos netos son de reducción de la contaminación (Dammert, Javier, & Bautista, 2018)

En los últimos años ha aumentado la necesidad de sustituir las fuentes de energía tradicionales por energías renovables debido a la preocupación por el medio ambiente; con esto, la energía solar gana fuerza, ya que genera poco impacto ambiental y su operación no implica emisión de gases (Stocker & Delabeneta, 2018).

La energía renovable puede aportar importantes beneficios a la sociedad. Además de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, los gobiernos han creado políticas de energía renovable para lograr algunos objetivos, incluida la creación de beneficios para la salud y el medio ambiente a nivel local, los cuales son: un acceso más fácil a la energía, especialmente en las zonas rurales, avanzar

hacia el logro de los objetivos de seguridad energética mediante la diversificación de los tipos de tecnologías y recursos energéticos, y un mayor auge económico y social a través de posibles oportunidades de empleo y economía de crecimiento. Si los responsables de la formulación de políticas desean aumentar la tasa de crecimiento de las energías renovables y al mismo tiempo que se cumplan los ambiciosos objetivos de mitigación del cambio climático, serán esenciales los compromisos a largo plazo y una actitud flexible (Pendón, et al., 2017).

El planeta recibe alrededor de  $1,5 \times 10^{18}$  kWh de energía solar, que puede ser aprovechada por la humanidad, que abastecería toda la demanda mundial. Este hecho indica que, además de ser responsable de mantener la vida en la tierra, la radiación solar tiene el potencial de ser una fuente inagotable de energía limpia (Pinho & Galdino, 2014).

## **Energía Solar**

Es la energía que se obtiene al capturar la luz solar. En la energía solar fotovoltaica se tiene el uso de placas de compuestos de silicio, los cuales capturan esta radiación solar para la producción de electricidad. El precio ofrecido por producir electricidad con esta tecnología se ha reducido de más de US 20c/kWh a US 3,5c/kWh en 2017. La energía solar es muy flexible en sus aplicaciones por la facilidad de colocar paneles de dimensiones pequeñas para bajo consumo, pero tiene la limitación de que sólo es económica en áreas con abundancia de sol y durante ciertas horas (Dammert, Javier, & Bautista, 2018).

La energía solar térmica, también conocida como energía solar térmica, utiliza la energía del sol para generar, que luego se utiliza como fuente de energía en los hogares y la industria, convirtiendo esta energía en energía mecánica y luego en energía eléctrica (Caballero, 2023).

## **Radiación Solar**

Estimar cuánta radiación solar tomará una ubicación es cada vez más importante en los proyectos que usan esta forma de energía como fuente primaria, tanto en sistemas fotovoltaicos como térmicos. Con la tecnología actual hay modelos que permiten el cálculo de la radiación solar con un margen de error tolerable, siempre estimando que la cantidad de radiación electromagnética que admite una zona de la superficie terrestre, depende de factores diversos como las nubes. Gracias a las mediciones satelitales y las estaciones meteorológicas diseminadas por toda la tierra, estimar la radiación se transforma en una labor alcanzable. Teniendo en cuenta ello, los datos (longitud, altitud, latitud, ángulo de inclinación, etc.) básicos del lugar en donde se realizará la búsqueda se pueden conseguir estas aproximaciones. A partir de un proyecto nacional cuya fuente de energía es la radiación solar, es posible determinar la irradiancia solar, la producción de electricidad, la cantidad de recursos no renovables que se pueden ahorrar y el impacto medioambiental minimizado. Como resultado estamos respondiendo a la fuerte y creciente demanda existente en nuestro país por el uso de energías renovables (García, Arias, & Ávalos, 2017).

Los rayos provenientes del sol que caen a la superficie de la tierra con distintas intensidades se dividen según las longitudes de onda en las que están presentes. Este grupo de longitudes de onda se denomina espectro electromagnético, que contiene radiaciones desde las longitudes de onda más cortas hasta las más altas, como los rayos  $\gamma$ , rayos X, ultravioleta, luz visible, infrarrojos, microondas y radiofrecuencia. Los gases atmosféricos, vapor de agua, polvo, hollín, polen y otros, bloquean la mayor parte de la radiación solar, dando lugar a los fenómenos de dispersión, absorción y reflexión, reduciendo hasta un 50% la potencia de la radiación incidente, provocando variabilidad y estacionalidad. Sin embargo, una gran cantidad de esta radiación que llega a la superficie terrestre se puede utilizar para generar muchos tipos de energía y es necesaria para satisfacer las necesidades humanas (Vanegas, Villicaña, & Arrieta, 2015).

## **Proyectos Fotovoltaicos**

El principal desafío de los proyectos de generación de energía es asegurar su sostenibilidad desde la fase de pre inversión, donde la cooperación entre todos los actores relevantes del proyecto es esencial para superar los obstáculos que surgen en las diferentes fases del proyecto. Así mismo, las soluciones técnicas deben de cumplir con las normas de calidad marcadas por las instituciones reguladoras competentes. Los proveedores garantizan los equipos y brindan asistencia técnica constante y oportuna, mientras que el aspecto social asegura el buen manejo de los recursos naturales y de la economía, garantizando así las condiciones mínimas para la sostenibilidad (Cabal, 2014).

## **Combustibles Fósiles**

La mitigación del cambio climático impulsa un cambio urgente en la toma de decisiones. Conservar el calentamiento global por debajo del límite tolerable (2°C) para sobrevivir requerirá reducciones significativas en las emisiones globales de gases del efecto invernadero durante los próximos años. Con la tecnología vigente, implica un abandono decisivo de los combustibles fósiles y el capital físico relacionado. El cambio necesario se puede realizar de dos formas, 1) En un escenario favorable, el cambio a una economía baja en carbono es gradual, ya que los costos de cumplimiento son manejables y es poco probable que una realineación de los activos de carbono presente algún riesgo. Sin embargo, en ausencia de nuevas intervenciones políticas o avances tecnológicos, es probable que la cantidad de gases de efecto invernadero en la atmósfera continúe aumentando a mediano plazo. 2) En un escenario desfavorable y diferido, el cambio a una economía baja en carbono es tardía. Una disminución de la importancia de los controles de emisiones puede llevar a la imposición repentina de restricciones cuantitativas sobre el uso de fuentes de energía en carbono, ya que el costo de conversión será aún mayor (Pendón, et al., 2017).

La producción de cemento y el uso de combustibles fósiles son las fuentes más importantes de gases de efecto invernadero en el mundo, contribuyendo con casi el 68 %. Entre los años 1750 y 2011, estas dos actividades liberaron 375 Pg. (1 Pg. = 1015 g) de carbono a la atmósfera, en comparación con las emisiones de la deforestación y otros cambios de uso de la tierra (180 Pg. de carbono) (Stocker, et al., 2013).

### **Lógica Difusa**

La lógica difusa suministra una herramienta flexible capaz de gestionar y agrupar diferentes variables de evaluación y de esta manera proporciona una importante ayuda a los tomadores de decisiones en la identificación de problemas (Román, 2018).

En el primer nivel, se puede pensar en la lógica difusa como un lenguaje que nos faculta a convertir oraciones complejas del lenguaje natural a una forma matemática. Los atributos de un conjunto difuso se especifican en una forma de objetivo con un grado de dependencia, o continuidad, en el rango  $[0,1]$ . Esta opinión va en contra de la teoría de conjuntos clásica, en la que los objetos tienen sólo un grado de pertenencia (Función característica), que toma sólo el valor binario  $\{0, 1\}$ . A cada objeto  $x$  en un conjunto difuso  $X$  se le otorga un grado de pertenencia, cuya función generalmente se describe por  $\mu(x)$  (Zadeh, 1965).

### **Sistema Experto**

Hay diversas formas de generar programas que actúan como sistemas expertos, siendo la primera y la más popular los sistemas basados en reglas, que usan la siguiente regla para representar el proceso: Opinión experta. Diversos expertos creen que una parte importante del razonamiento humano se puede expresar en forma de reglas, lo cual otorga un interés complementario a los sistemas basados en reglas (Santoyo, Vargas, & Sanchez, 2015).

## **Fuzzificación**

El ingreso a un sistema de lógica difusa tipo Mamdani suele ser un valor numérico, por ejemplo, de un experto; para que el sistema difuso procese este valor, debe traducirse a un "lenguaje" que pueda ser procesado por la unidad de inferencia. Esta es una función de salida que toma un valor numérico del exterior y lo convierte en un valor "difuso" que puede ser procesado por la unidad de inferencia. Estos valores difusos son el rango de los valores de entrada pertenecientes a los diferentes conjuntos difusos dividido por el dominio del discurso de las diferentes variables de entrada del sistema (Román, 2018).

## **Defuzzificación**

Para conseguir el valor de control o señal de salida, es imprescindible defuzzificar las reglas difusas que son alteradas por una o varias señales de ingreso, esta defuzzificación da como consecuencia un conjunto difuso de la señal de salida. La defuzzificación se cuantifica buscando el centro geométrico de las áreas y no es necesario cuantificar las dos coordenadas de este centro sino sólo la referente al rango, que es el valor de la variable de salida (Montalvo, 2017).

## **Variables Lingüísticas**

Las variables lingüísticas son importantes porque son la base para representar el conocimiento humano. Estas variables lingüísticas deben de tener nombres y valores lingüísticos en un determinado dominio del discurso, que luego dan lugar a oraciones producidas por reglas semánticas. En la experiencia cotidiana, las palabras se utilizan para indicar variables. Por ejemplo, cuando se dice "la velocidad del carro es alta", la palabra "alta" se usa para describir la velocidad actual. Esto significa que la velocidad vigente variable toma "alta" como su valor, puedes usar un número como 80 km/h. Si a una variable se le asigna un número, hay una buena descripción



matemática, pero si la variable usa palabras como valor, no hay una descripción matemática. Por tanto, si una variable puede tomar como valor una palabra del lenguaje natural, se denomina variable lingüística (Alba, 2019).

### **Software Matlab**

Para determinar la viabilidad técnica de un sistema de generación y almacenamiento de hidrógeno y compararlo con un sistema de almacenamiento en batería, es necesario modelar y simular cada una de las etapas que componen el sistema. El modelo matemático implementado es Matlab/Simulink, que permite usar bibliotecas existentes y le permite crear sistemas de inferencia difusos (FIS) en scripts de Matlab e integrarlos a través de cuadros de función con parámetros de entrada y parámetro de control. Uno de los mayores inconvenientes de los sistemas automatizados que utilizan hidrógeno a la hora de modelar en software matemático que se centra en el comportamiento eléctrico del sistema se debe al tiempo de simulación durante el cual se obtendrán resultados óptimos. No es posible observar el beneficio a largo plazo que me brindan estos sistemas, ya que representar los modelos a nivel químico en el software Matlab/ Simulink requiere dominar el conocimiento de las ecuaciones involucradas que representan este fenómeno para mí (Mateus, 2021).

# CAPÍTULO III

## MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 Métodos de la investigación

Para la elaboración del presente proyecto de tesis se utilizaron los siguientes métodos:

#### **Método Analítico**

Este método sirve para el tratamiento teórico, debido a que orienta la extracción de las partes (variables) de un todo en relación a un tema, con el fin de analizarlos por separado.

#### **Método Deductivo**

Este método sirve para llegar a particularizar (variables de entrada) y a determinar elementos puntuales en la ejecución del trabajo sobre la base de teorías, conceptos generales y paradigmas que nos proporcionan las competencias digitales, con la finalidad de sacar una conclusión general (Variable de salida).

La metodología de investigación a seguir, se basará en lo siguiente:

- Con el aporte de un experto, se definen las reglas que permitan conseguir un resultado de las variables lingüísticas (Radiación Solar, Costo de la tecnología, Costo de la Operación y mantenimiento, Costo del terreno y Costo del petróleo) y sobre la base de una revisión bibliográfica a profundidad se logra determinar sus valores.
- Todos los cálculos se realizan utilizando la herramienta del Matlab y su kit de lógica difusa.

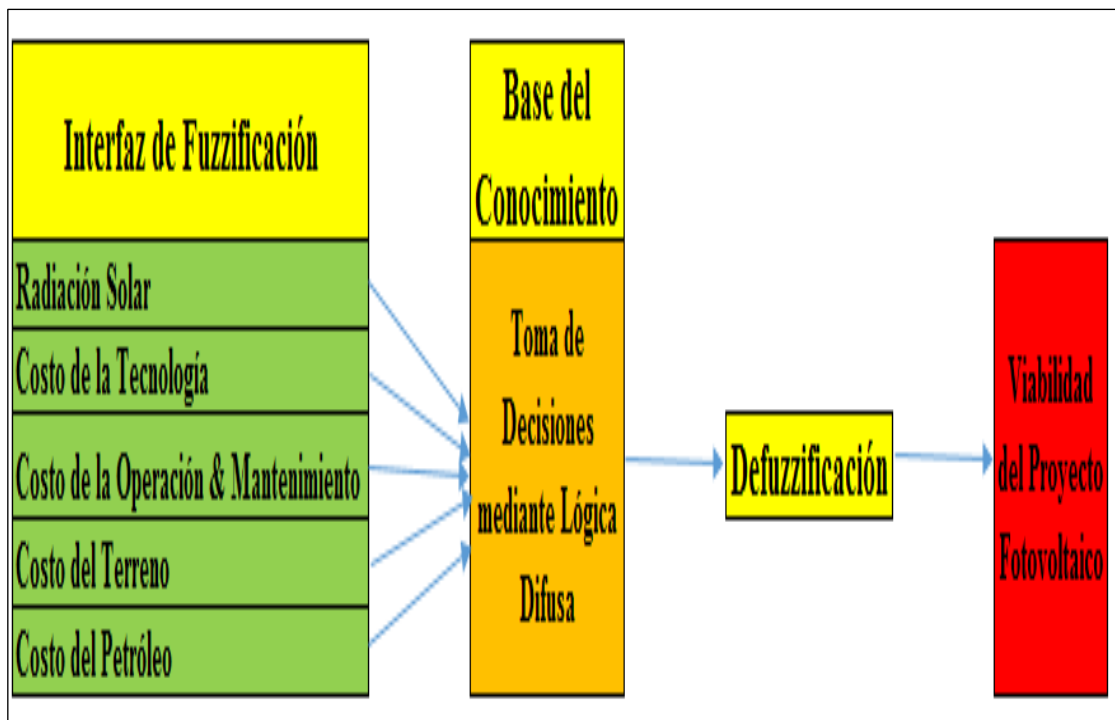
- Posterior a ello, se genera un sistema de inferencia difuso (FIS), con la finalidad de evaluar si un determinado proyecto fotovoltaico es viable o no.

Se usó la experiencia y el conocimiento de un experto para formar un sistema de inferencia difuso (FIS) que simule su comportamiento. En comparación con el control tradicional, el control difuso tiene dos ventajas prácticas: 1) Que un modelo matemático del proceso controlado es innecesario y 2) Que se obtiene un sistema de inferencia difuso (FIS) no lineal desarrollado según el experimento sin complejidad matemática.

Para evaluar un proyecto fotovoltaico es necesario tomar los valores reales, en el lugar y en el momento, en el que se pretende llevar a cabo el proyecto.

**Figura 8**

*Sistema Experto Basado en la Lógica Difusa Aplicado a Proyectos*



Fuente: Modificado de (Román, 2018).

### **3.2 Diseño o esquema de la investigación**

Para la contrastación de la hipótesis se usa la herramienta del Matlab y su kit de lógica difusa y se utiliza un instrumento de recolección de datos tipo cuestionario.

### **3.3 Población y muestra**

#### **Población**

La población a utilizar son las 07 centrales solares que se encuentran conectadas al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN).

#### **Muestra**

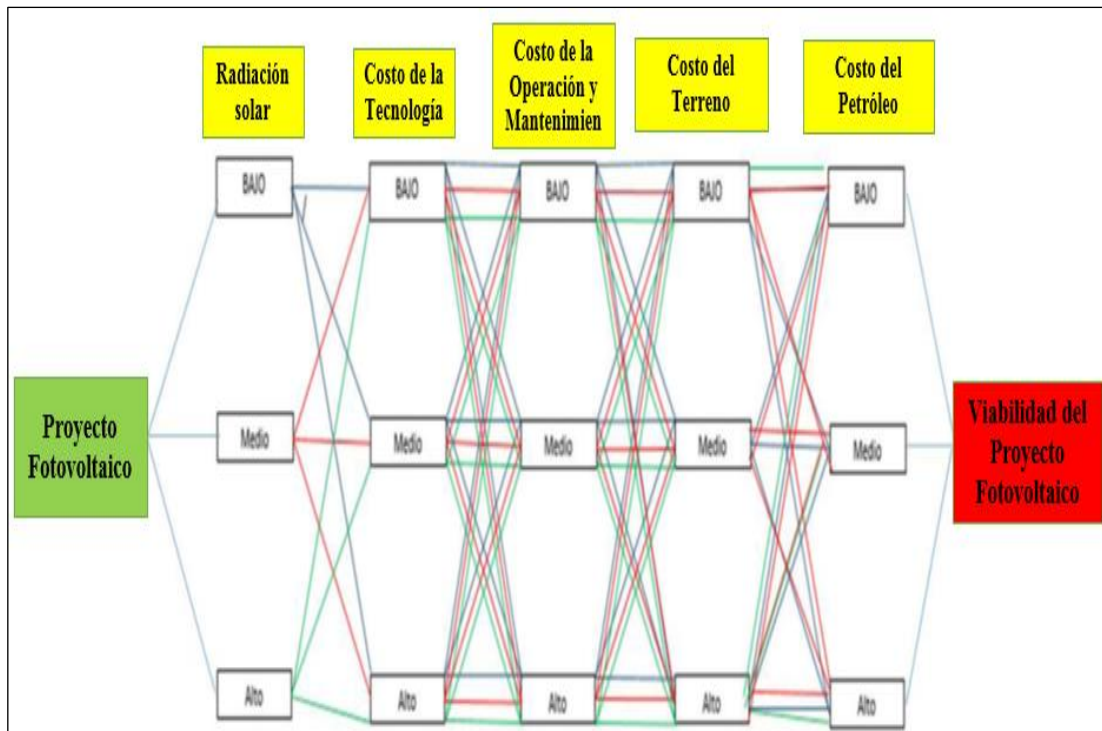
La muestra a utilizar es dos (02) centrales solares (C.S Moquegua FV y C.S Rubí), las cuales se encuentran conectadas al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN).

Una vez definas las variables lingüísticas, cada variable de éstas es evaluada entre sí para obtener un resultado.

Un árbol de toma de decisiones es una manera analítica y gráfica de representar todos los eventos que pueden aparecer de una decisión tomada en un determinado momento.

**Figura 9**

*Árbol de Toma de Decisiones*



Fuente: Modificado de (Román, 2018).

### 3.4 Variables e indicadores de la investigación

- Variable Dependiente: Evaluación de Proyectos Fotovoltaicos.
- Variable Independiente: Lógica difusa.
- Variables de entrada: Radiación Solar, Costo de tecnología, Costo de la Operación y Mantenimiento, Costo del Terreno y Costo del Petróleo.
- Variables de salida (y): Inversión Confiable (Viabilidad del proyecto).
- Indicadores para las variables de entrada y salida: Bajo, Medio y Alto.
- Indicadores para la variable de salida es: Viabilidad o no del proyecto.

### 3.5 Actividades del proceso investigativo

Las principales actividades fueron la construcción y el desarrollo del modelo difuso para la evaluación de los proyectos fotovoltaicos en el Perú, utilizando el software Matlab y su kit de Lógica Difusa.

### **3.5.1 Construcción del modelo**

La construcción del modelo se realiza en función de las coincidencias sobre el tema de la mayoría de los investigadores y de las experiencias propias. Esto quiere decir que es posible que otro investigador tenga experiencias distintas y por tanto algunas formulaciones pueden diferir. Esto se verá reflejado en la elección de las variables lingüísticas, de su cantidad y de sus valores lingüísticos, en la forma de las funciones de pertenencia y de las reglas básicas. El modelo se basa en un sistema de inferencia difuso (FIS) creado a través del software Matlab y su kit de lógica difusa. Para comprender el modelo, es importante aclarar el significado de cada variable lingüística utilizada (Seuret, et al., 2016).

Para desarrollar un programa de evaluación de varias variables lingüísticas se puede tener en cuenta muchos indicadores, los cuales serán considerados según su peso. Esta es una de las ventajas de evaluar proyectos mediante programación inteligente, ya que no depende de la cualificación del evaluador, aunque sean evaluadores diferentes. Pero el principal problema es que estos indicadores necesitan ser medibles para poder ser fusificados e integrados al sistema. En este caso, las variables claves que se consideran para tomar una decisión viable para un proyecto fotovoltaico son:

- A) Radiación Solar.
- B) Costo de la Tecnología.
- C) Operación y Mantenimiento (O&M).
- D) Costo del Terreno.
- E) Precio del Petróleo.

#### **3.5.1.1 Radiación Solar**

Para medir la cantidad de energía que llega del sol se emplea como unidad el Watt-hora y para conocer la potencia de dicha radiación se usa el Watt

(en SI). Los rayos del sol se aprovechan más cuando llegan perpendicularmente a una superficie. Por lo tanto, la cantidad de radiación que recibe el planeta depende de la inclinación y es variable, dichos cambios se deben de conocer para tener la mayor cantidad de energía disponible (Román, 2018).

El Atlas de la Energía Solar del Perú elaborado por el Ministerio de Energía y Minas señala que el país cuenta con una elevada radiación solar, 5,5 a 6,5 kWh/m<sup>2</sup>; 5,0 a 6,0 kWh/m<sup>2</sup> en la Costa y en la Selva de aproximadamente 4,5 a 5,0 kWh/m<sup>2</sup>. Unas cifras que denotan el altísimo potencial fotovoltaico que tiene nuestro país, el cual debe ser aprovechado para generar energía limpia para sus habitantes. Cifras que manifiestan el alto potencial fotovoltaico del Perú y que hacen atractivo su uso, pudiendo satisfacer las necesidades de millones de familias que viven en zonas rurales con escasos recursos y carecen del servicio de energía eléctrica. Sin duda, el Perú se suministra ahora con más fuentes de energía renovables y cuenta con grandes proyectos en materia solar que han aflorado en los últimos años. Además, gracias al Plan Nacional de Electrificación Rural (PNER) 2016-2025 promovido por el gobierno peruano, se está potenciando la energía del sol para generar prosperidad y dotar a las zonas rurales del bienestar necesario. El PNER pretende que miles de familias que no disponen de electricidad reciban energía eficiente y sostenible gracias al uso de este recurso tan abundante en el Perú (Minem, 2021).

El Perú es uno de los países con mayor recurso solar en el mundo debido a su proximidad a la línea ecuatorial. Cuenta con muchas más horas de sol durante la mayor parte del año, comparado con los países europeos. Es decir, con los países con mayor desarrollo e implementación de tecnologías de conversión solar. En prácticamente todo el territorio peruano existe una excepcional disponibilidad de energía solar debido a su abundancia y uniformidad a lo largo del año. Estudios del Banco Mundial indican que las Regiones de Arequipa, Moquegua y Tacna disponen de los mayores

recursos solares en el Perú para el desarrollo de tecnologías fotovoltaicas y solar térmica.

**Tabla 1**

*Potencial Solar Nacional*

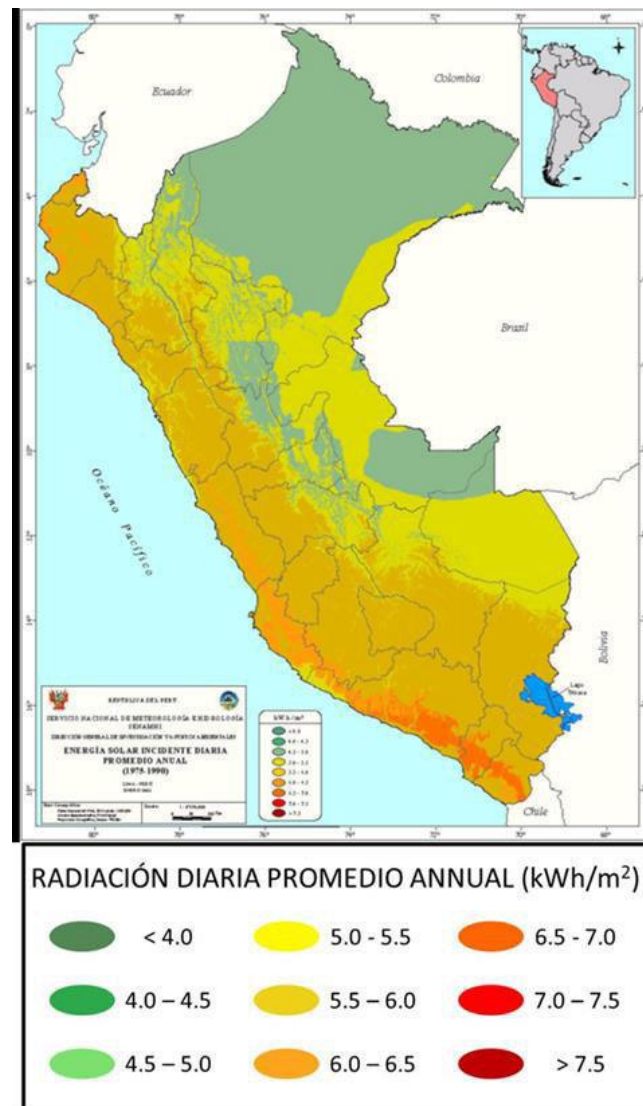
Región	Radiación Promedio Anual, KWh/m2-año	Intervalo de Radiación Promedio Anual, KWh/m2-año
<u>Rentable</u>		
Ancash	5.1	5.13-5.63
Arequipa	5.3	5.63-6.13
Lambayeque	5	5.5-6.0
Moquegua	5.3	5.75-6.25
Puno	5.1	5.38-5.88
Tacna	5.3	5.75-6.25
<u>Medianamente Rentable</u>		
Amazonas	4.5	4.88-5.38
Apurímac	4.8	5.38-5.88
Ayacucho	4.8	5.38-5.88
Cajamarca	4.5	5.0-5.5
Cusco	4.4	5.13-5.63
Huancavelica	4.5	5.38-5.75
Huánuco	4.3	4.75-5.25
Ica	4.6	5.5-6.0
Junín	4.7	5.13-5.63
La Libertad	4.8	5.13-5.64
Pasco	4.1	4.88-5.38
Piura	4.4	5.63-6.73
San Martín	4	4.63-5.13
Tumbes	4.4	5.75-6.25
<u>Poco Rentable</u>		
Lima	3.9	5.13-5.63
Loreto	3.9	4.63-5.13
Madre de Dios	3.9	4.75-5.25
Ucayali	3.3	4.63-5.13

Fuente: (EnergyNews, 2020).



**Figura 10**

*Mapa de Energía Solar Incidente Diaria*



Fuente: (EnergyNews, 2020).

### 3.5.1.2 Costo de la Tecnología

Cada tecnología es técnica y económicamente adecuada de manera única para brindar servicios específicos, relacionados con la satisfacción de la demanda de electricidad.

Todas las tecnologías son necesarias porque se complementan para proporcionar a los consumidores la energía que necesitan en cada

momento de la forma más adecuada (en términos de coste y seguridad de suministro). Por ejemplo, algunas tecnologías tienen costos fijos muy altos (depreciación de la inversión, parte fija de los costos de operación y mantenimiento, etc.) pero costos variables muy bajos. Estas tecnologías son las más adecuadas para producir una gran cantidad de horas de trabajo al año. Por el contrario, algunas tecnologías tienen costos fijos muy bajos, pero costos variables muy altos. Estas tecnologías son más adecuadas para la producción un pequeño número de veces al año (cuando la demanda es mayor). Existe una necesidad creciente de tecnologías que puedan hacer frente a las limitaciones ambientales produciendo electricidad sin causar contaminación, Por tanto, queda claro que cada tecnología proporciona un servicio específico para satisfacer la demanda global y que las tecnologías son necesarias porque se complementan para satisfacer siempre la demanda de la forma más adecuada técnica, económica y ambientalmente (Román, 2018).

#### **3.5.1.2.1 Centrales Hidroeléctricas**

De acuerdo a las estadísticas de Irena (2020), las centrales hidroeléctricas se caracterizan por ser intensivas en capital y requerir mayores plazos de entrega en comparación con el resto de tecnologías renovables. Estos plazos suelen estar conformados por una etapa de desarrollo, permisos, construcción y puesta en operación. A diferencia de las demás fuentes de energía renovables, el costo total instalado promedio global se incrementó de 1254 US\$/kW en 2010 a 1704 US\$/kW en 2019, principalmente en Asia, África y Sudamérica (Osinergmin, 2020).

#### **3.5.1.2.2 Centrales Eólicas**

De acuerdo a las estadísticas de Irena (2020), el costo total instalado promedio de los proyectos onshore disminuyó en 72% durante el periodo 1983-2019 y 24% entre 2010 y 2019, pasando de 5179 US\$/kW a 1473

US\$/kW, y de 1949 US\$/kW a 1473 US\$/kW, respectivamente. El costo total instalado promedio de los proyectos offshore alcanzó su máximo nivel en 2013, cuando fue de aproximadamente 5740 US\$/kW. Al año 2019, el costo se disminuyó a 3800 US\$/kW debido a la reducción en los precios de las materias primas, políticas gubernamentales estables, diseños mejorados de turbinas, fabricación industrializada, mejoras en la logística e incremento del tamaño de las turbinas (Osinergmin, 2020).

#### **3.5.1.2.3 Centrales Solares**

Durante los últimos diez años se viene registrando una reducción del costo de los módulos solares. Según Irena (2020), entre 2009 y 2019, los precios de los módulos de silicio cristalino en Europa bajaron entre 87% y 92%. En 2019, el costo de los módulos convencionales alcanzó los 270 US\$/kW, lo cual implica una reducción de 14% con respecto a 2018. Asimismo, en 2019, el costo total instalado promedio alcanzó un valor de 995 US\$/kW, siendo 18% más bajo que durante 2018 y 79% menor con respecto a 2010 (Osinergmin, 2020).

#### **3.5.1.2.4 Centrales Geotérmicas**

El costo instalado de plantas geotérmicas depende, en gran medida, de los mercados de productos básicos y petróleo, la calidad del yacimiento y la cantidad de pozos. Al respecto, el costo total instalado de las plantas de ciclo binario suele ser mayor que el de las plantas de vapor seco y flash debido a las diferencias de temperatura. El costo instalado está conformado por el costo de desarrollo del proyecto, los costos de exploración y evaluación de recursos y los costos de perforación de pozos. Así mismo, de acuerdo con datos de Irena (2020), el costo total instalado promedio a nivel global pasó de 4171 US\$/kW en 2018 a 3916 US\$/kW en 2019, lo cual implica una disminución de 6.1% (Osinergmin, 2020).

### 3.5.1.2.5 Centrales Termoeléctricas

En un estudio realizado en el año 2005 por la NEA (Nuclear Energy Agency, agencia intergubernamental que opera dentro de la OCDE), vemos registrado el coste de 27 centrales eléctricas de carbón en todo el mundo. Las centrales eléctricas de carbón consideradas en el estudio utilizan diferentes calidades de combustibles, como por ejemplo lignito (uno de los más comunes), y diferentes tecnologías, sean estos la convencional constituida por una caldera, turbina y generador, o un ciclo combinado de combustión y gasificación integrada (IGCC). Obviamente tales diferencias conducen a variaciones en los costes de inversión, eficiencias y costes nivelados totales de generación de electricidad, pero la mayoría de las centrales eléctricas de carbón tienen costes específicos de construcción que oscilan entre 1000 y 1500 US\$/kW. Dado que los datos anteriores son de 2005, y aunque sirvan de referencia, es necesario saber que los costos de construcción estimados para las nuevas centrales eléctricas de carbón son inciertos y ha aumentado significativamente en los últimos años. De hecho, el costo estimado de una nueva central eléctrica alimentada de carbón, excluyendo los costos financieros, ha alcanzado los 3,500 US\$/kW y se espera que aumente aún más. En términos de plantas de energía a gas natural, el costo promedio de los generadores de gas natural instalados en 2015 fue de 696 US\$/kW, un 28% menos que en el 2013. Casi el 75% de la capacidad instalada de gas natural en el 2015 correspondió a plantas de ciclo combinado con un costo medio instalado de 614 US\$/kW. Las centrales eléctricas de gas natural de ciclo combinado tienen al menos una turbina de gas y una turbina de vapor y, en general, son más eficientes que las centrales eléctricas que sólo utilizan turbinas de gas. En el 2015, se instalaron aproximadamente 1,5 GW de centrales eléctricas alimentadas con gas natural que funcionan únicamente con turbinas de gas natural con motores de combustión interna son más caras, con un costo promedio de 779 US\$/kW. Las centrales eléctricas de gas natural con motores de combustión interna eran más caras, con un promedio de 1,798 US\$/kW

para los 0,2 GW instalados. Finalmente, encontramos las centrales eléctricas convencionales que utilizan petróleo como combustible fósil. Son las menos comunes después del carbón y el gas natural y, según datos del 2017, el costo de construcción de estas centrales ha cambiado un poco: unos 856 US\$/kW. Las diferencias encontradas con los otros tipos de plantas convencionales pueden deberse a diferencias en los equipos utilizados para procesar los combustibles fósiles asociados antes de quemarlos. Por lo demás, los tres tipos de centrales consideradas tienen funciones similares, siendo la principal diferencia el costo del combustible utilizado. A través del estudio de la administración de Energía de Estados Unidos, sobre los diferentes costos de capital diferentes plantas de energía, estamos informados sobre la inversión inicial requerida para construir una planta de energía de ciclo combinado de gas natural típica. El costo de una central eléctrica de 23 702 MW se estima en 978 US\$/kW. Por otro lado, según la compañía energética Duke Energy, su proyecto de central de ciclo combinado de 625 MW cerca de Wilmington, Carolina del Norte, tiene un costo de 551 millones de dólares, o alrededor de 882 US\$/kW de capacidad instalada (Negro, 2020).

Los costos de tecnología son una de las variables más difíciles de reducir en cierta medida porque dependen no sólo del tipo de tecnología sino también del tamaño de la instalación. Como en este trabajo nos interesa definir el universo de la variable lingüística del Costo de la Tecnología, solo tomaremos valores extremos como se muestra en la tabla 2.

**Tabla 2***Costo de la Tecnología*

Tecnología de Proceso	Costo de Tecnología (US\$/kW)
Hidroeléctrica	1704
Eólica	1473-3800
Solar	995
Geotérmica	3916
Termoeléctrica	614-3500

Fuente: Elaboración propia

**3.5.1.3 Costo de Operación y Mantenimiento**

Cualquiera que sea la fuente para crear la energía eléctrica mediante combustibles fósiles o renovables, los costos de operación y mantenimiento (O&M) son una parte muy importante para un proyecto de inversión de una central eléctrica, siendo una pieza del rompecabezas de inversiones que, junto con los gastos del capital, costos de los combustibles, esto debe ser equilibrado contra la rentabilidad del ciclo de vida, la eficiencia y disponibilidad de la fuente de energía. Los costos fijos como variables, incluyen también el mantenimiento preventivo y correctivo, supervisión de la central, costos laborales, la gestión de activos, seguridad e higiene para garantizar la salud y seguridad del personal laboral (Román, 2018).

**3.5.1.3.1 Centrales Hidroeléctricas**

Según información de Irena (2018), los costos anuales de operación y mantenimiento de los proyectos hidroeléctricos representan entre 1% y 4% de los costos de inversión anual. el presupuesto de operación y mantenimiento se distribuye de la siguiente manera: i) mantenimiento (entre 20% y 61%), ii) salarios (entre 13% y 74%); y, iii) materiales (4%). Así mismo los componentes del costo de operación y mantenimiento

incluyen el reacondicionamiento de equipos, la revisión de turbinas, el rebobinado de generadores y las reinversiones en sistemas de control (Osinergmin, 2020).

#### **3.5.1.3.2 Centrales Eólicas**

El incremento de la competencia entre los proveedores de servicios de mantenimiento, además del desarrollo tecnológico, ha permitido minimizar los costos de operación y mantenimiento de las centrales de energía eólica on shore. No obstante, aún representan hasta el 30% del costo nivelado de electricidad de las plantas de este tipo. Según estadísticas de Irena (2020), durante el periodo 2016-2018, el costo de operación y mantenimiento de la energía eólica onshore a nivel mundial se mantuvo entre 33 US\$/kW anuales y 56 US\$/kW anuales. Dinamarca reportó el costo más bajo, mientras que Alemania el más alto, debido a la diferencia de los componentes que conforman los costos de operación en ambos países. Así mismo, de acuerdo con IEA et al. (2018), debido al incremento de la competencia entre proveedores del servicio de operación y mantenimiento, al año 2018, los costos disminuyeron a 70 US\$/kW por año y 129 US\$/kW anuales (Osinergmin, 2020).

#### **3.5.1.3.3 Centrales Solares**

Según las estimaciones de EIA (2020), el costo de operación y mantenimiento promedio registrado entre 2018 y 2019 por centrales a gran escala en Estados Unidos fue de entre 10 US\$/kW y 18 US\$/kW. Entre 75% y 90% del total de costos de operación y mantenimiento está conformado por los costos de mantenimiento preventivo y limpieza de módulos, de acuerdo al tipo de sistema. Asimismo, el costo promedio de operación y mantenimiento en los países miembros de la OCDE, durante 2019, alcanzó los 18,3 US\$/kW (Osinergmin, 2020).

#### **3.5.1.3.4 Centrales Geotérmicas**

El costo de operación y mantenimiento de las centrales geotérmicas es mayor que el de los parques eólicos on shore y de las plantas solares fotovoltaicas, debido a que la producción de generación de energía del pozo se reduce a lo largo del tiempo. Cabe indicar que el costo nivelado de electricidad promedio a nivel global se incrementó de 0,05 US\$/kW estimado en 2010 a 0.07 US\$/kW durante 2019. Sin embargo, de acuerdo con Irena (2020), se prevé una reducción del costo entre 2019 y 2021 (Osinermin, 2020).

#### **3.5.1.3.5 Centrales Termoeléctricas**

En el caso de centrales eléctricas convencionales, cuando hablamos de costes operativos totales, adquieren una importancia relevante los costes asociados al combustible utilizado (en caso de añadir éstos a los costes de operación y mantenimiento). Hasta el 70% de estos costes puede estar asociado al combustible, en función de que sea carbón, gas natural o petróleo, estando además ligados a constantes fluctuaciones según el mercado donde se haga la compra del mismo. Aunque en la actualidad el precio de estos combustibles sigue siendo muy cambiante y es complicado dar con una cifra exacta, a lo que hay que sumar la incertidumbre que vive en este momento la economía mundial debido a la crisis provocada por el Coronavirus (covid-19). Los costos se encuentran entre 16,30 US\$/kW a 59,54 US\$/kW (CNE, 2020).

Una central de ciclo combinado generará una mayor cantidad de energía eléctrica. Esto supone ventajas tanto medioambientales como económicas, pues además de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases contaminantes, disminuye el coste asociado al combustible utilizado. Los costos se encuentran entre 11 US\$/kW a 27,60 US\$/kW (Negro, 2020).



El costo de operación y mantenimiento (O&M) es una de las variables claves para un proyecto de inversión, en la siguiente tabla 3 observamos los costos que con lleva generar un kW de energía.

**Tabla 3**

*Resumen de Costos de Operación y Mantenimiento*

Tecnología de Proceso	Costo de Operación y Mantenimiento (US\$/kW-anual)
Hidroeléctrica	17-68
Eólica	33-129
Solar	10-18,3
Geotérmica	57
Termoeléctrica	11-59,64

Fuente: Elaboración propia

### 3.5.1.4 Costo de Terreno

El Perú se mantiene como el quinto país de América Latina más atractivo para invertir en energía renovable y el costo del terreno es una de las variables de suma importancia en un proyecto de inversión, La ubicación y características del terreno, antes que sus condiciones y calidad, es lo que ahora más influye en la cotización. Los terrenos sin arbolado ni obstáculos que resten horas de sol son los más demandados y valorados. No importa que sean improductivos, lo que interesa es que los paneles que se instalen queden expuestos al sol el mayor tiempo posible.

Las características de los terrenos tienen que ser:

- Preferentemente plano.
- De uso agrícola o no agrícola.
- Contar camino de acceso.
- Contar con una línea de alta tensión sobre el predio.
- Contar con una Subestación eléctrica en un radio de 10 km.

aproximadamente.

- No necesita agua.

Una instalación solar debe de estar ubicada en un lugar con suficiente radiación solar, un ambiente limpio y muchos días soleados durante todo el año para que sea apta para proyectos de energía solar. A la hora de elegir el terreno se debe de tener en cuenta que sea un terreno casi horizontal en el eje norte-sur y ligeramente elevado en el eje norte-sur. Se debe de prestar atención a áreas donde no haya montañas cercanas o edificios que puedan proyectar sombras. Muchos propietarios están dispuestos a vender sus tierras para cultivos, ganadería, proyectos energéticos y otros fines. Pero no todos los terrenos son aptos para proyectos solares vendidos a la red. Teniendo en cuenta que las regiones establecidas como más rentables en la radiación promedio anual (KWh/m<sup>2</sup>-año) se encuentran en los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna, se realiza el análisis de los terrenos en dichos departamentos (Román, 2018).

El costo del terreno es una de las variables claves para un proyecto de inversión, en la siguiente tabla 4 observamos los costos de los terrenos por metro cuadrado.

**Tabla 4**

*Precios de Terreno por Metro Cuadrado*

Departamento	Total, m <sup>2</sup>	Precio por Hectárea	Precio Promedio US\$/m <sup>2</sup>
Moquegua	10000	5200	0,52
Tacna	10000	10000	1
Arequipa	10000	15000	1,5

Fuente: Elaboración propia

### 3.5.1.4 Costo del Petróleo

Según la edición de perspectivas de la economía mundial de abril de 2016, los precios del petróleo se han manteniendo constantemente bajos desde hace más de un año, sin embargo, la economía mundial aún no ha experimentado el estímulo que muchos esperaban. Paradójicamente, creemos que los beneficios globales podrían aparecer solo después de que los precios disminuyan un poco y las economías desarrolladas pueden superar la situación actual de bajas tasas de interés (Obstfeld et al, 2016).

El precio que se utiliza para los combustibles líquidos (Diesel B5 de alto y bajo azufre, residual N° 6 y residual N° 500) considera la alternativa de abastecimiento en el mercado local, incluyendo el flete de transporte hasta la central de generación. Con base en lo establecido en el artículo 124 del Reglamento de la LCE, se considera como precios de combustibles líquidos a los fijados por Petroperú (publicada en su lista de precios) en las diversas plantas de ventas que posee a nivel nacional, siempre y cuando no supere los precios de referencia ponderados que publica el OSINERGMIN.

Los valores se muestran en los siguientes cuadros:

**Tabla 5**

*Precios Ponderados Publicados por Osinergmin (Actualizado al 30.09.2021)*

Plantas de abastecimiento	US\$/Barril			
	Diesel B5 S50	Diesel B5	Residual 6	Residual 500
Talara	110.585106		81.3394584	82.7611219
Piura	112.412959			
Eten	114.34236			84.1827853
Salaverry	115.256286		83.4719536	
Chimbote	113.428433			84.893617

Supe	112.412959		84.1827853	83.4719536
Callao	112.412959		79.917795	80.6286267
Conchan	112.412959		79.917795	80.6286267
Cerro de Pasco		108.452611		
Pisco	112.412959			84.893617
Mollendo	116.27176		84.1827853	84.893617
Juliaca	119.115087			
Cusco	118.099613			
Ilo	117.185687		84.1827853	
El Milagro		111.295938	85.6044487	
Tarapoto		106.523211		
Yurimaguas		113.123791	87.7369439	
Iquitos		109.366538	91.1895551	
Pucallpa		109.366538		
Puerto Maldonado	130.488395			

Fuente: (Consultores, 2021).

### 3.6 Técnicas e instrumentos de la investigación

- La técnica es a través de la encuesta y el instrumento de recolección de datos es mediante cuestionario.
- Recolección de información de las centrales solares utilizadas como muestra.
- El software Matlab y su kit de Lógica difusa.

### 3.7 Procedimiento para la recolección de datos

Se realiza de la siguiente manera:

- Se elabora el formato de cuestionario, de acuerdo a las variables lingüísticas de entrada (Ver Anexo 01). El cuestionario es entregado al experto para su evaluación y registro correspondiente con la finalidad de determinar los valores a procesar.
- Se revisa la información de las variables lingüísticas de entrada, correspondiente a las 02 centrales solares utilizadas como muestras.

- Se ingresa al software Matlab y su kit de lógica difusa, la información del cuestionario y de las 02 centrales solares de muestra, con la finalidad de determinar si un proyecto fotovoltaico es viable o no.

### **3.8 Técnicas de procesamiento y análisis de los datos**

Una vez determinados los valores de las variables lingüísticas (Radiación solar, costo de tecnología, costo de operación y mantenimiento, costo de terreno y costo de petróleo) a procesar, éstos son ingresados al software Matlab y su kit de lógica difusa, a través del proceso de defuzzificación.

Para determinar la regla y poder realizar el árbol de toma de decisiones se emplea la siguiente fórmula:

$$\mu(x) = 3^5 = 243$$

Donde 3: Indica el número de decisiones (alto, medio, bajo) por cada variable lingüística.

Donde 5: Indica el número de variables lingüísticas.

Posteriormente, mediante el proceso de defuzzificación se determina la viabilidad o no de un proyecto fotovoltaico.

#### **3.8.1 Desarrollo del modelo (Análisis de datos)**

Para la evaluación de un proyecto se deben tomar los valores reales, en el lugar donde se pretende realizar el proyecto y en los tiempos en que se realiza el mismo. Posteriormente fusificarlos según las funciones de pertenencias definidas y someterlos a las reglas creadas, luego de obtener los valores difusos de las variables de salida defusificarlos para obtener un valor que tenga sentido para un ser humano. Este proceso se realiza con el Tool Kit de Fuzzy Logic de Matlab.

### 3.8.1.1 Definición de las funciones de membresía

De acuerdo a la construcción del modelo y al criterio del experto, se tienen los siguientes valores de las variables de entrada.

**Tabla 6**

*Valores Límites de la Función de Membresía*

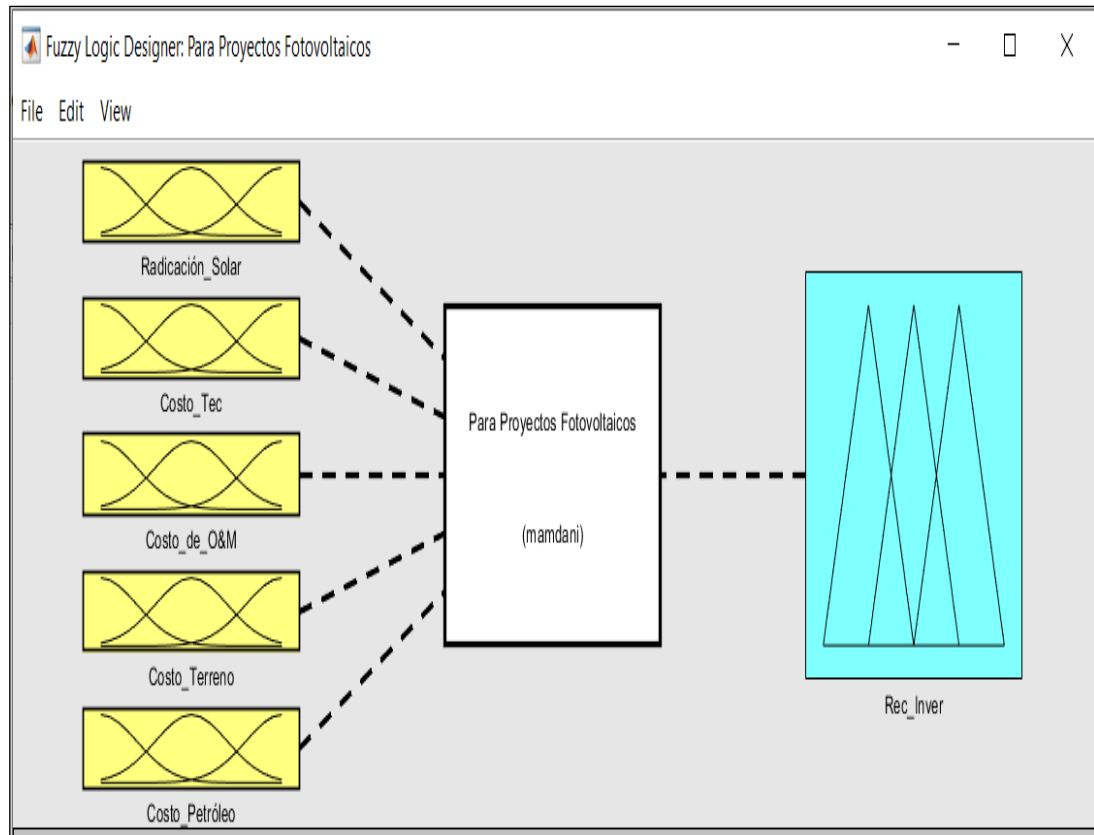
Variables de entrada	Criterios
Radiación Solar (kWh/m <sup>2</sup> x Día)	Radiación Solar: Baja < 4.5
	Radiación Solar: Media 4.5 a 5.2
	Radiación Solar: Alta > 5.2
Costo de la Tecnología (\$/W)	Costo de la Tecnología: Baja < 1.7
	Costo de la Tecnología: Media 1.7 a 3.8
	Costo de la Tecnología: Alta > 3.8
Costo de la Operación y Mantenimiento (\$/kWh)	Costo de la O&M: Baja < 17
	Costo de la O&M: Media 17 a 33
	Costo de la O&M: Alta > 33
Costo del Terreno (\$/m <sup>2</sup> )	Costo del Terreno: Baja < 1
	Costo del Terreno: Media 1 a 1.3
	Costo del Terreno: Alta > 1.3
Costo del Petróleo (\$/Barril)	Costo del Petróleo: Baja < 80
	Costo del Petróleo: Media 80 a 110
	Costo del Petróleo: Alta > 110

Fuente: (Farfan, 2024)

Estos mismos valores los insertamos en el programa de Matlab, como se muestra en la siguiente figura:

**Figura 11**

*Editor de Funciones de Membresía por Matlab*



*Nota.* Elaboración propia.

Se ha tomado las funciones de membresía, triangular y trapezoidal, para la “radicación solar”, tal como se muestra a continuación:

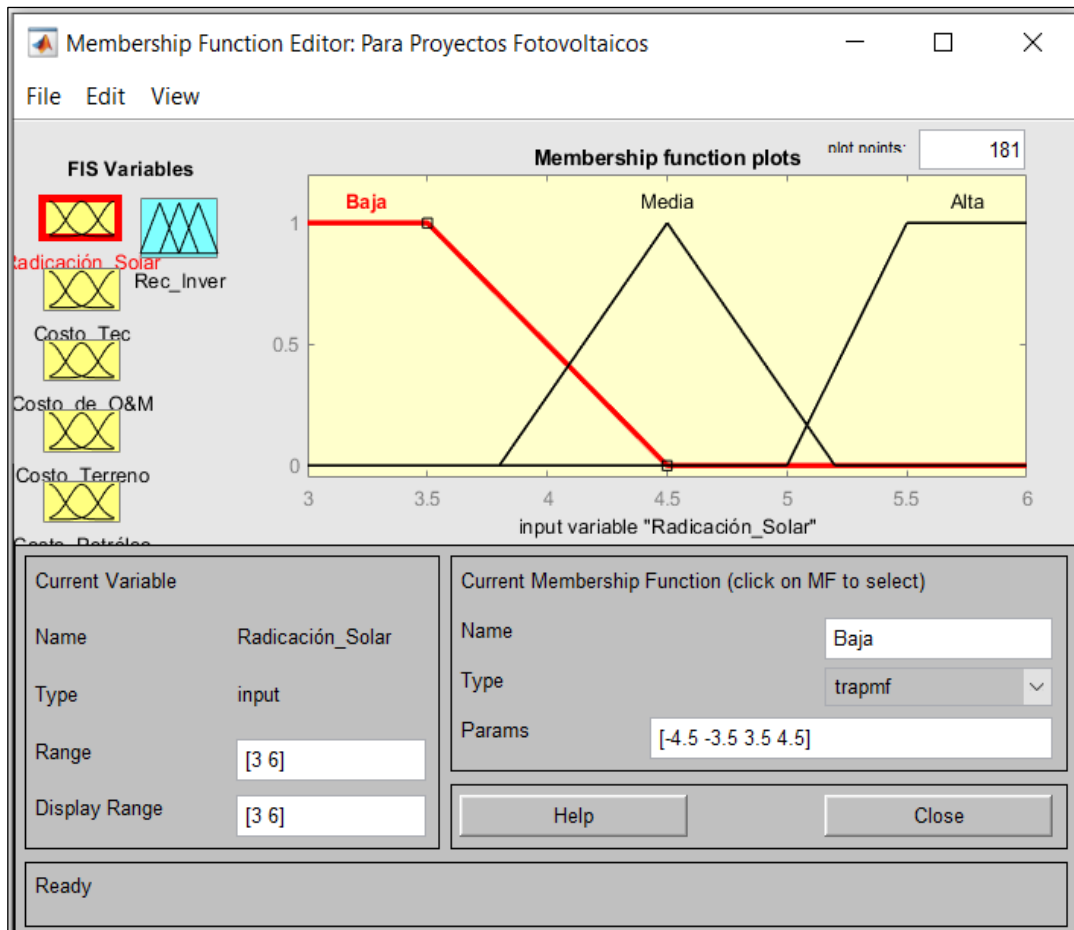
$$\mu_B(X) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 4.5 \\ \frac{4.5 - x}{4.5 - 3.5} & \text{si } 3.5 < x < 4.5 \\ 1 & \text{si } \geq 3.5 \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_M(X) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 3.8 \\ \frac{x - 3.8}{4.5 - 3.8} & \text{si } 3.8 < x < 4.5 \\ \frac{5.2 - x}{5.2 - 4.5} & \text{si } 4.5 < x < 5.2 \\ 0 & \text{si } \geq 5.2 \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_A(X) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 5.5 \\ \frac{x-5}{5.5-5} & \text{si } 5 < x < 5.5 \\ 0 & \text{si } < 5 \end{cases} \quad (3)$$

**Figura 12**

*Representación de la Variable Lingüística “Radiación Solar” en Matlab*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

Se ha tomado las funciones de membresía, triangular y trapezoidal, para el “costo de la tecnología”, tal como se indican a continuación:

$$\mu_B(X) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 1.7 \\ \frac{1.7-x}{1.7-0.5} & \text{si } 0.5 < x < 1.7 \\ 1 & \text{si } \geq 0.5 \end{cases} \quad (4)$$

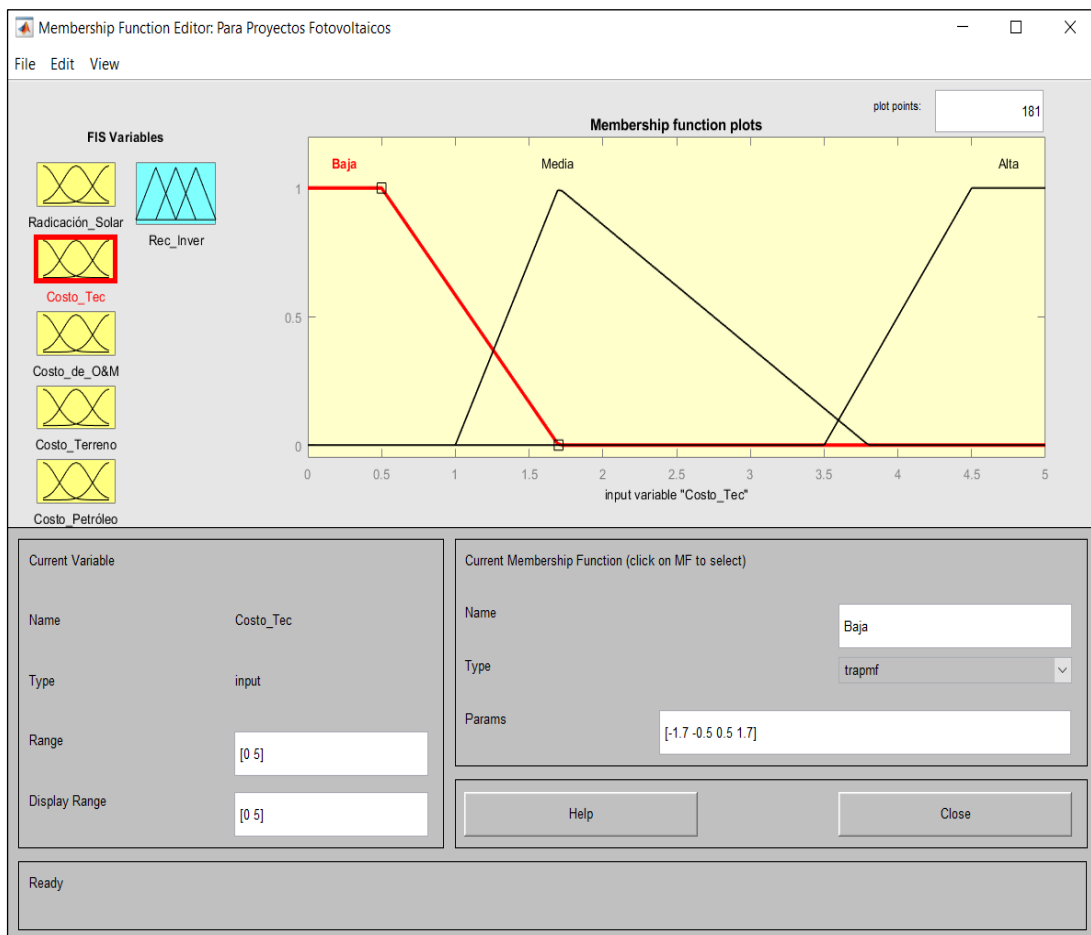


$$\mu M(X) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 1 \\ \frac{x-1}{1.7-1} & \text{si } 1 < x < 1.7 \\ \frac{3.8-x}{3.8-1.7} & \text{si } 1.7 < x < 3.8 \\ 0 & \text{si } \geq 3.8 \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu A(X) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 4.5 \\ \frac{x-3.5}{4.5-3.5} & \text{si } 3.5 < x < 4.5 \\ 0 & \text{si } < 3.5 \end{cases} \quad (6)$$

**Figura 13**

*Representación de la Variable Lingüística “Costo de la Tecnología” en Matlab*



Fuente: Elaboración propia.

Se ha tomado las funciones de membresía, triangular y trapezoidal, para el “costo de operación y mantenimiento”, tal como se muestra a continuación:

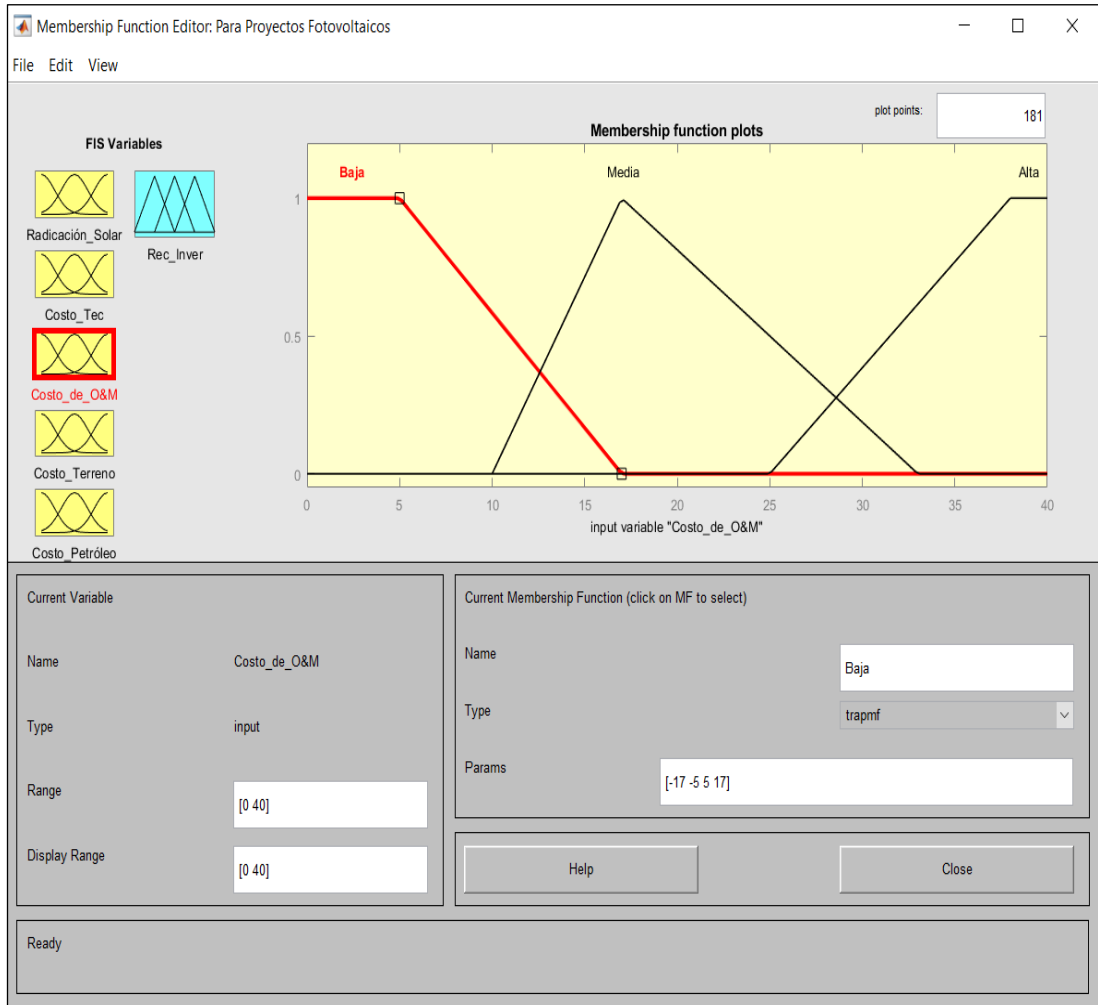
$$\mu_B(X) = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{si } x \leq 17 \\ \frac{17-x}{17-5} & \text{si } 5 < x < 17 \\ 1 & \text{si } \geq 5 \end{array} \right\} \quad (7)$$

$$\mu_M(X) = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{si } x < 10 \\ \frac{x-10}{17-10} & \text{si } 10 < x < 17 \\ \frac{33-x}{33-17} & \text{si } 17 < x < 33 \\ 0 & \text{si } \geq 33 \end{array} \right\} \quad (8)$$

$$\mu_A(X) = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & \text{si } x > 38 \\ \frac{x-25}{38-25} & \text{si } 25 < x < 38 \\ 0 & \text{si } < 25 \end{array} \right\} \quad (9)$$

**Figura 14**

*Representación de la Variable Lingüística “Costo de Operación y Mantenimiento” en Matlab*



Fuente: Elaboración propia

Se ha tomado las funciones de membresía, triangular y trapezoidal, para el “costo de terreno”, tal como se muestra en la siguiente figura:

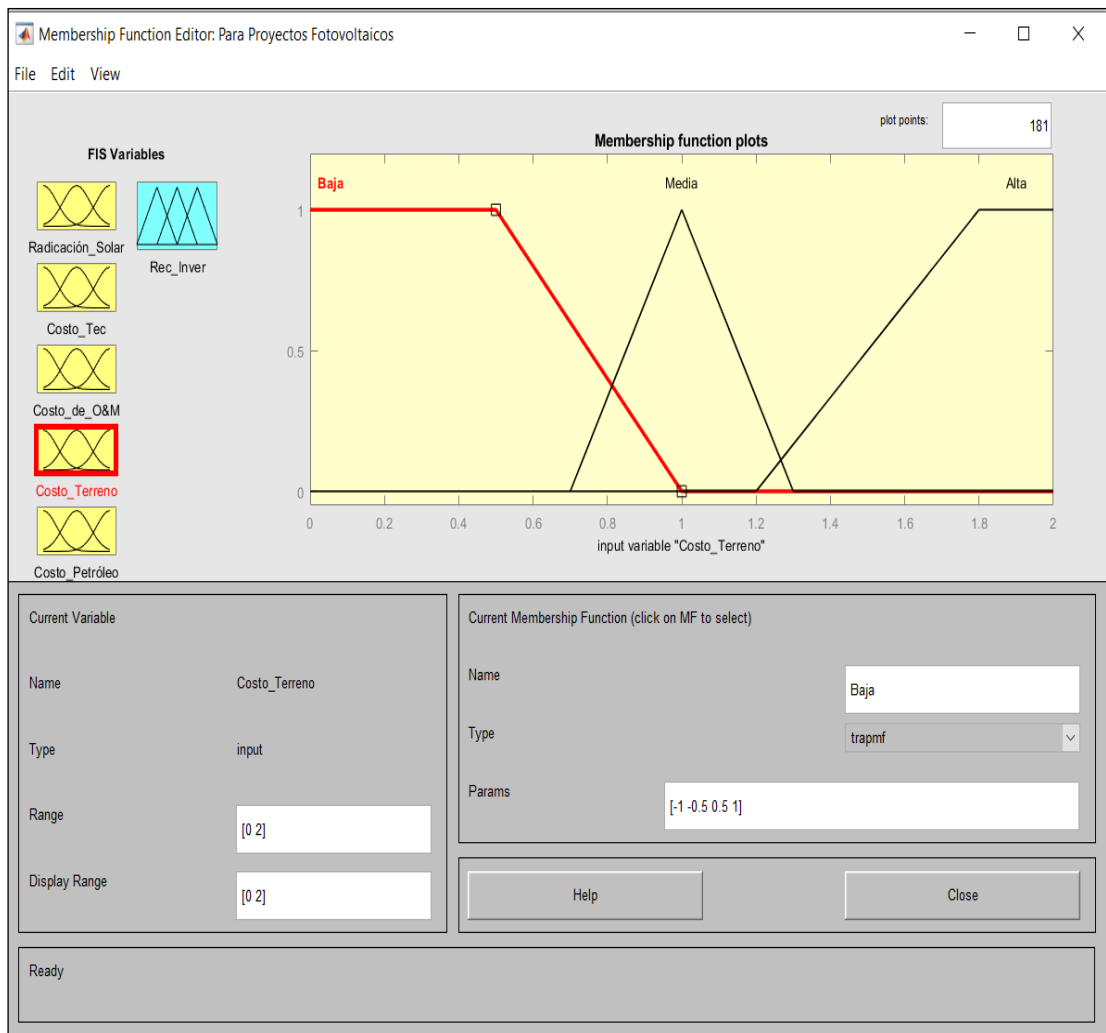
$$\mu_B(X) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 1 \\ \frac{1-x}{1-0.5} & \text{si } 0.5 < x < 1 \\ 1 & \text{si } \geq 0.5 \end{cases} \quad (10)$$

$$\mu M(X) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0.7 \\ \frac{x - 0.7}{1 - 0.7} & \text{si } 0.7 < x < 1 \\ \frac{1.3 - x}{1.3 - 1} & \text{si } 1 < x < 1.3 \\ 0 & \text{si } \geq 1.3 \end{cases} \quad (11)$$

$$\mu A(X) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 1.8 \\ \frac{x - 1.2}{1.8 - 1.2} & \text{si } 1.2 < x < 1.8 \\ 0 & \text{si } < 1.2 \end{cases} \quad (12)$$

**Figura 15**

*Representación de la Variable Lingüística “Costo del Terreno” en Matlab*



Fuente: Elaboración propia

Se ha tomado las funciones de membresía, triangular y trapezoidal, para el “costo del petróleo”, tal como se muestran a continuación:

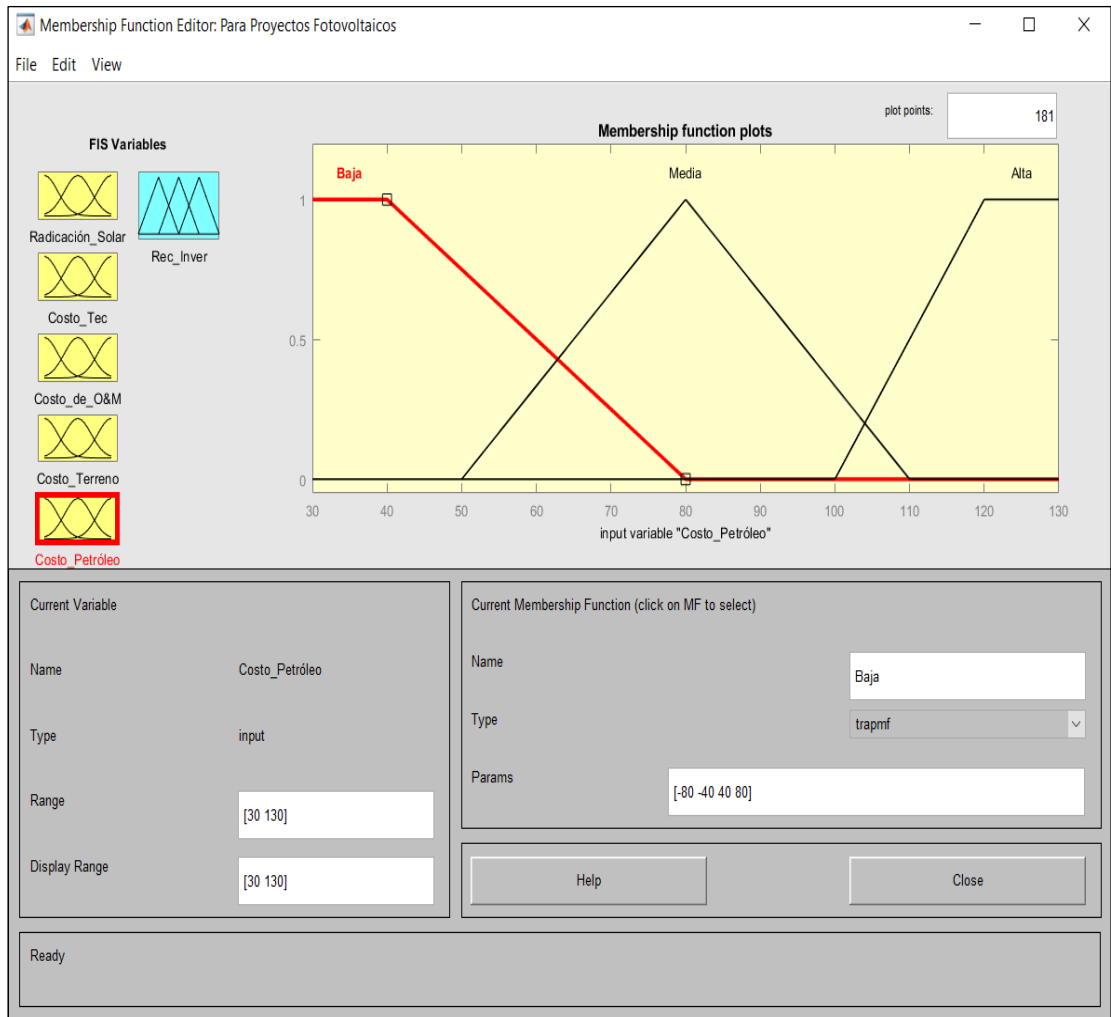
$$\mu_B(X) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 80 \\ \frac{80-x}{80-40} & \text{si } 40 < x < 80 \\ 1 & \text{si } \geq 40 \end{cases} \quad (13)$$

$$\mu_M(X) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 50 \\ \frac{x-50}{80-50} & \text{si } 50 < x < 80 \\ \frac{110-x}{110-80} & \text{si } 80 < x < 110 \\ 0 & \text{si } \geq 110 \end{cases} \quad (14)$$

$$\mu_A(X) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 120 \\ \frac{x-100}{120-100} & \text{si } 100 < x < 120 \\ 0 & \text{si } < 100 \end{cases} \quad (15)$$

**Figura 16**

*Representación de la Variable Lingüística “Costo del Petróleo” en Matlab*



Fuente: Elaboración propia

Se ha tomado las funciones de membresía, triangular y trapezoidal, para el “costo del petróleo”, tal como se muestran a continuación:

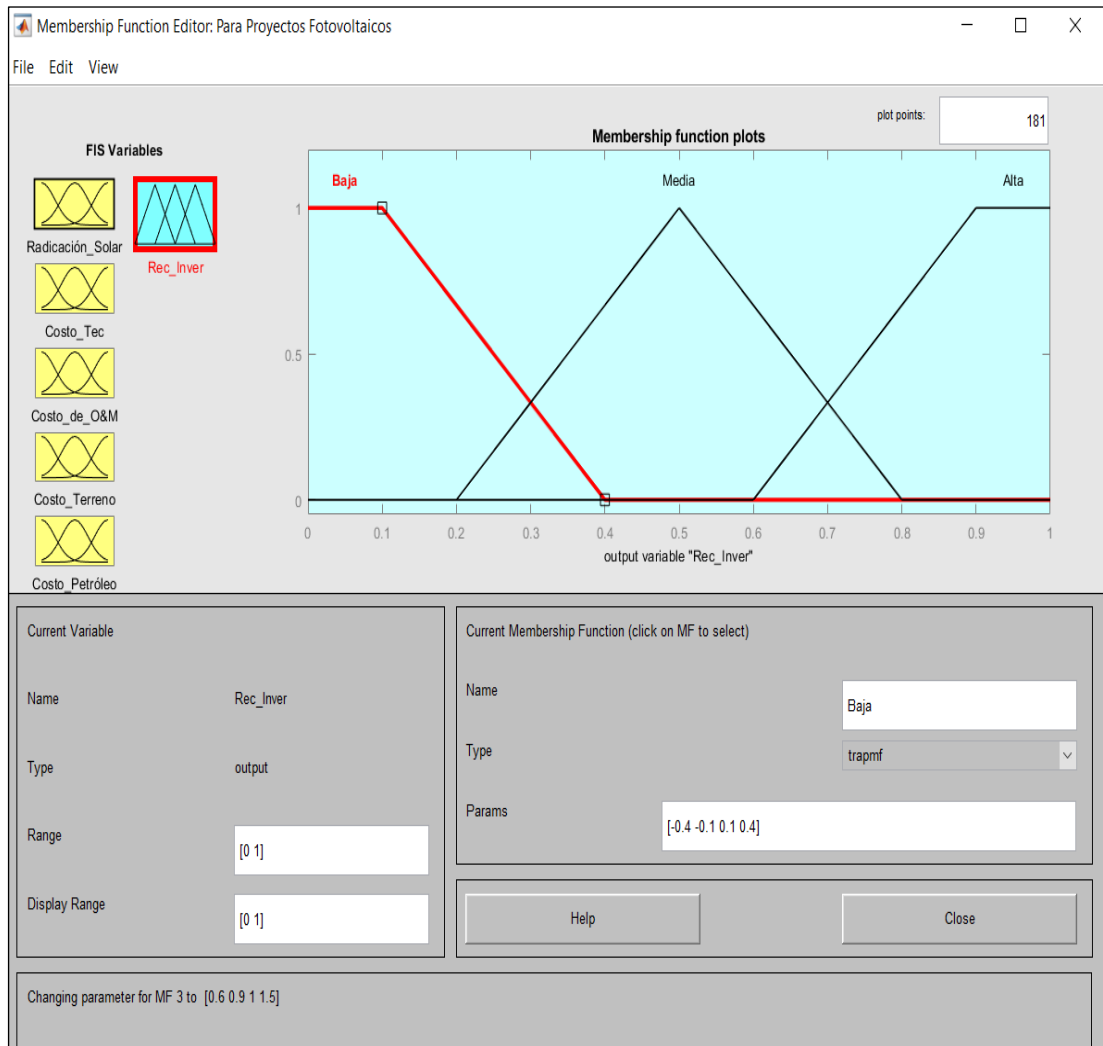
$$\mu_B(X) = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{si } x \leq 0.4 \\ \frac{0.4 - x}{0.4 - 0.1} & \text{si } 0.1 < x < 0.4 \\ 1 & \text{si } \geq 0.1 \end{array} \right\} \quad (16)$$

$$\mu M (X) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0.2 \\ \frac{x - 0.2}{0.4 - 0.2} & \text{si } 0.2 < x < 0.4 \\ \frac{0.8 - x}{0.8 - 0.4} & \text{si } 0.4 < x < 0.8 \\ 0 & \text{si } \geq 0.8 \end{cases} \quad (17)$$

$$\mu A (X) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 0.9 \\ \frac{x - 0.6}{0.9 - 0.6} & \text{si } 0.6 < x < 0.9 \\ 0 & \text{si } < 0.6 \end{cases} \quad (18)$$

**Figura 17**

*Representación de la Variable Lingüística “Recomendación de Inversión” en Matlab*



Fuente: Elaboración propia

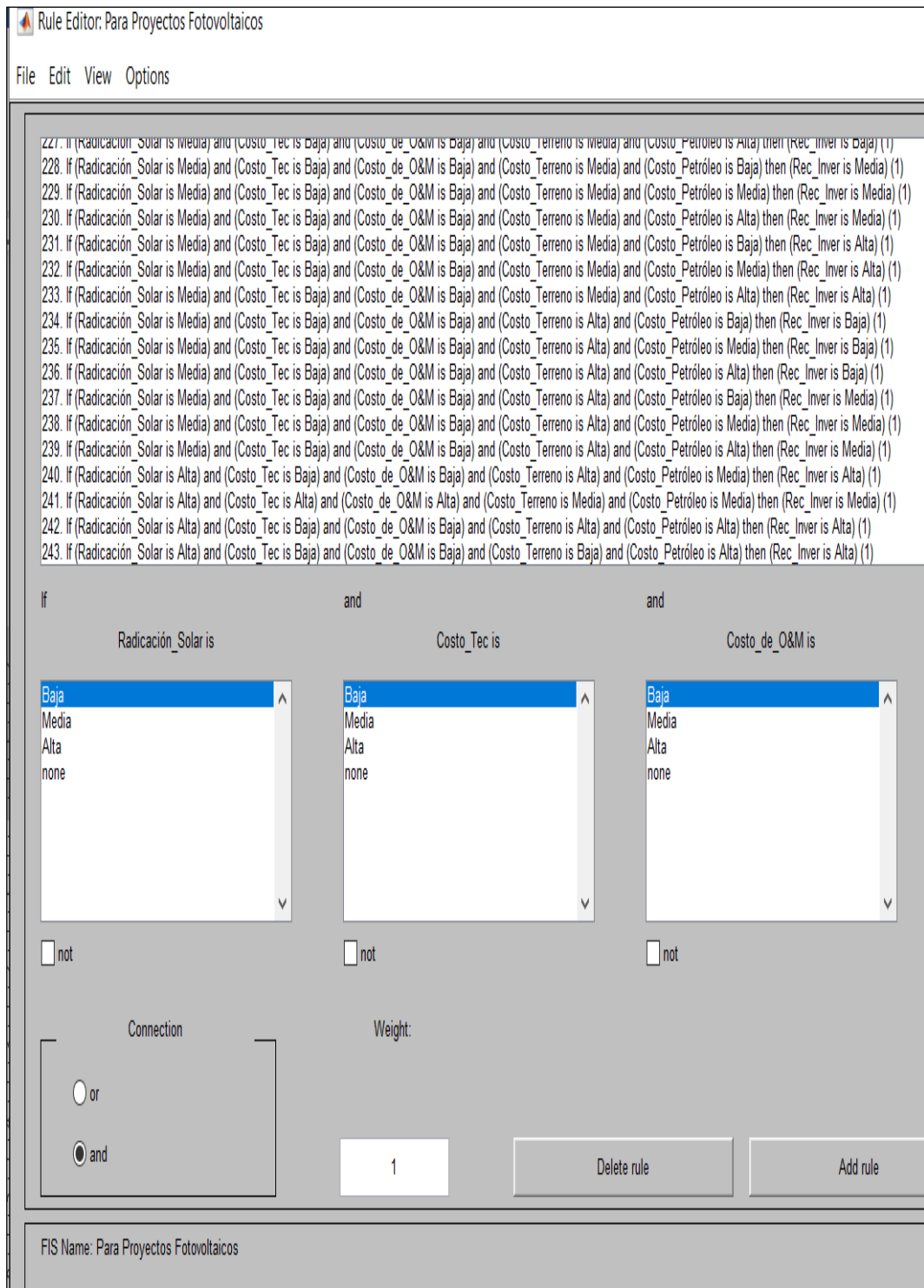
### **3.8.1.2 Definición de las reglas**

Las Reglas If - then son el núcleo del sistema de inferencia difuso (FIS), Al tener las 5 funciones de membresía con sus valores límites, comenzamos a formar cada una de las reglas para la toma de decisiones, Las reglas que se ha hecho para introducirlas al programa del Matlab, en la herramienta (fuzzy tools) son 243 posibles alternativas que pueden surgir en el problema y son como se muestran en la siguiente figura:



**Figura 18**

*Algunas Reglas para Evaluar el Proyecto Fotovoltaico*

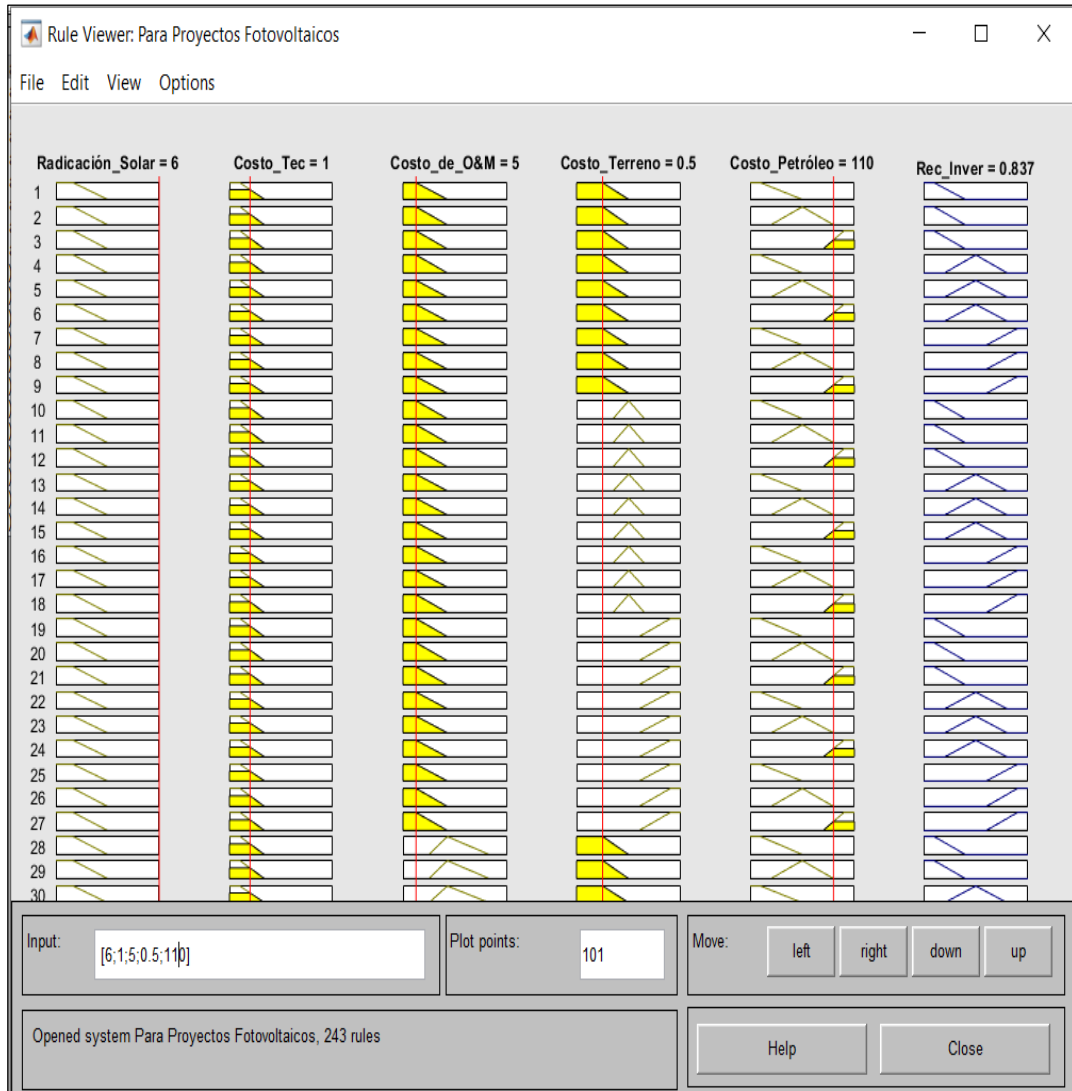


Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente figura se muestra la evaluación de las 243 reglas, así como los valores de las variables de salida.

**Figura 19**

*Aplicación de las reglas*



Fuente: Elaboración propia.

Con las variables lingüísticas definidas, ya es posible tener una respuesta sobre un determinado proyecto de energía solar fotovoltaica, ahora lo que se tiene que demostrar es su validación y evaluar un proyecto real.

Como uno de nuestros objetivos específicos es la validación del programa con un proyecto real, en este caso de estudio se analizan las

Centrales Solares Moquegua FV y Rubí.

### **3.8.1.2 Validación de los proyectos**

#### **3.8.1.2.1 Caso de estudio del proyecto de la Central Solar Moquegua FV**

Está ubicada en el distrito de Moquegua, provincia de Mariscal Nieto, departamento de Moquegua, a 1,410 metros sobre el nivel del mar.

Posee una potencia instalada de 16 megawatts. Se halla constituida por un gran número de módulos fotovoltaicos de 280 watts pico cada uno, instalados sobre estructuras metálicas en acero galvanizado ancladas sobre pilotes circulares de hormigón.

Opera con sistemas de seguimiento solar. El seguidor solar de un eje horizontal consta de una serie de vigas de torsión orientadas en dirección Norte-Sur sobre las que se encuentran montados los módulos fotovoltaicos.

Cuenta con dieciséis centros de transformación de 1 250 kVA cada uno. Entrega su energía al sistema eléctrico interconectado nacional a través de una línea de transmisión a 22,9 kilovoltios.

Fue puesta en operación comercial en diciembre del 2014, pero recién inaugurada en noviembre del 2015. Está concesionada a la empresa Moquegua FV SAC, que invirtió en ella US\$ 43 millones (Infraestructura Peruana, 2015).

## Figura 20

### Central Solar Moquegua FV



Fuente: (Infraestructura Peruana, 2015).

En la siguiente tabla, se muestran las variables lingüísticas de entrada que se necesitan para poder determinar si este Proyecto fotovoltaico es viable o no.

### Tabla 7

#### Variables lingüísticas de entrada C.S Moquegua FV

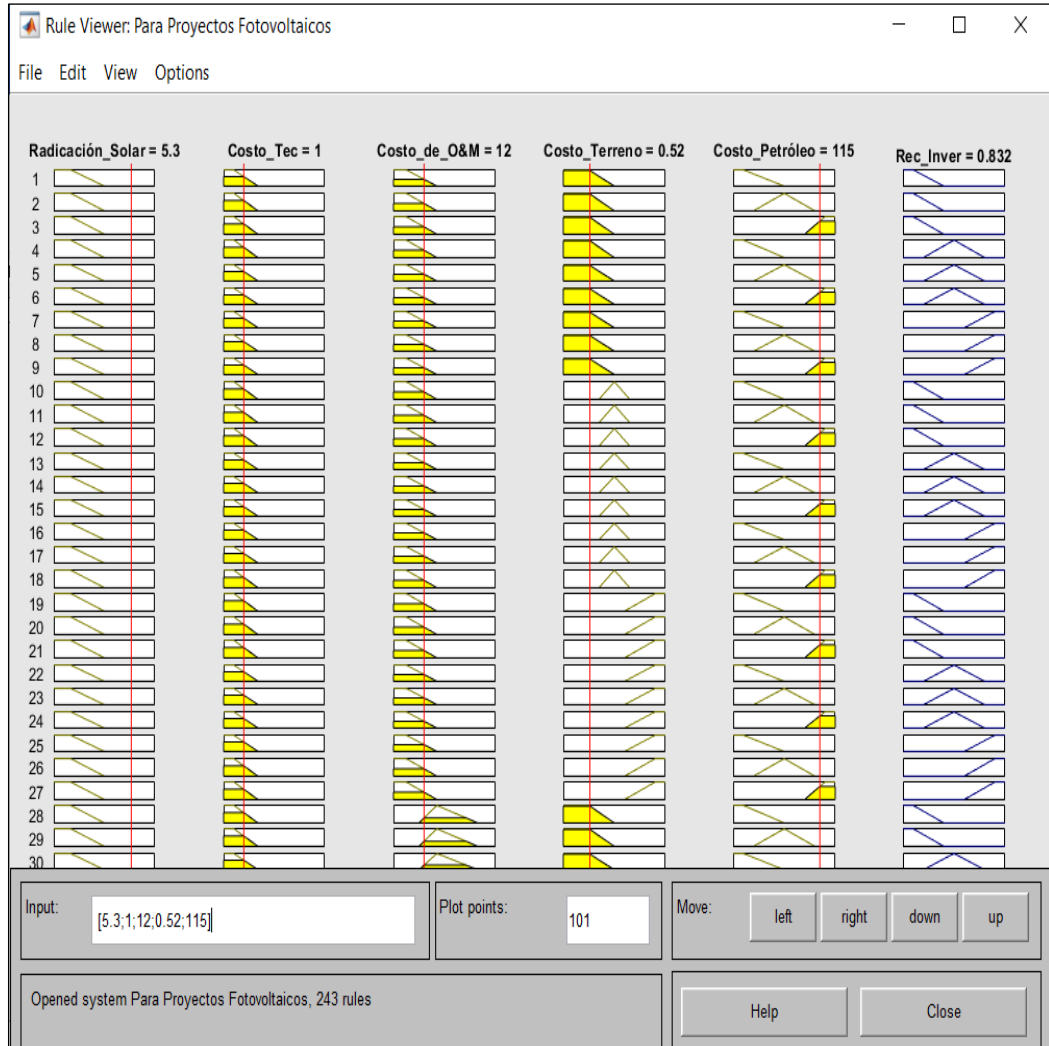
<i>Variables</i>	<i>Valor</i>
<i>Radicación Solar (kWh/m<sup>2</sup> x Día)</i>	<i>5,3</i>
<i>Costo de la Tecnología (\$/W)</i>	<i>1</i>
<i>Costo de la Operación y Mantenimiento (\$/kWh)</i>	<i>12</i>
<i>Costo del Terreno (\$/m<sup>2</sup>)</i>	<i>0,52</i>
<i>Costo del Petróleo (\$/Barril)</i>	<i>115</i>

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente figura se muestra el ingreso de los valores de las variables lingüísticas de entrada de la C.S Moquegua FV.

**Figura 21**

*Aplicación de las reglas de la C.S Moquegua FV*

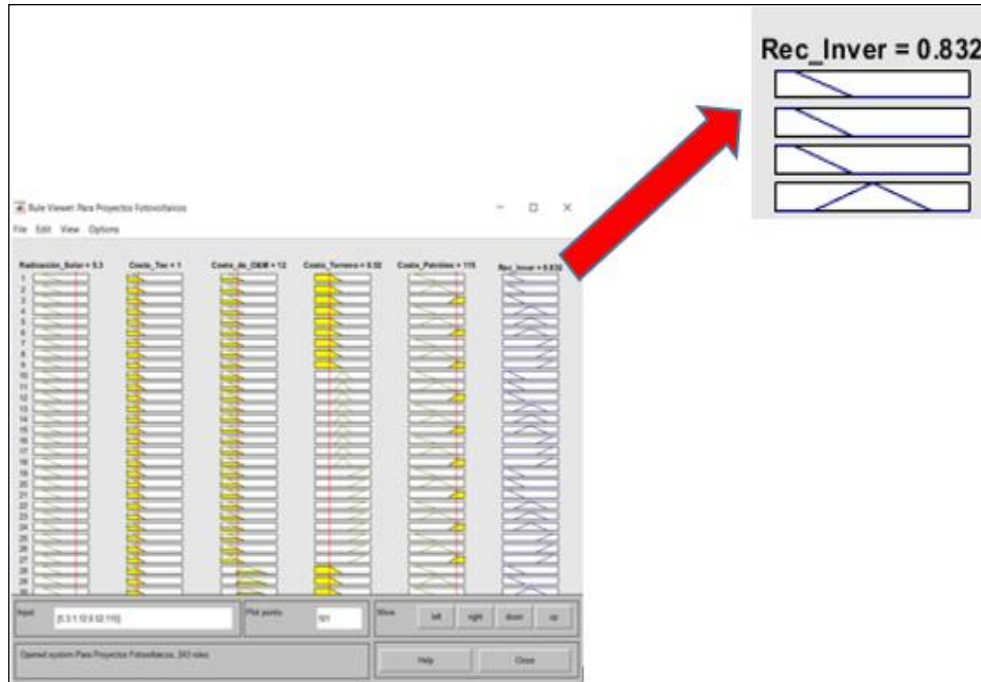


Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente figura, se muestra el valor de 0,832, obtenido de las variables lingüísticas de entrada definidas, el cual representa una recomendación de inversión del tipo alta, motivo por el cual este proyecto fotovoltaico es de carácter viable.

**Figura 22**

*Resultado de la aplicación de las reglas de la C.S Moquegua FV*



Fuente: Elaboración propia.

### 3.8.1.2.2 Caso de estudio del proyecto de la Central Solar Rubí

El proyecto se ubica en el distrito de Moquegua, provincia de Mariscal Nieto y departamento de Moquegua, ejecutado por Enel Green Power Perú. Tiene una potencia instalada de 144,8 MW e inició su operación comercial el 20 de marzo del 2018.

Una vez en operación la central será capaz de generar 440 GWh anuales, equivalentes al consumo de 351,177 hogares peruanos. Además, evitará la emisión de 209 343 toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera por año.

La capacidad de 144,8 MW se obtiene mediante la instalación de 560 880 módulos fotovoltaicos de 320 W pico cada uno.

Los paneles, en grupos de 90, están montados sobre estructuras de soporte con un eje de seguimiento en sentido norte/sur, a fin de optimizar la captación solar.

La conexión al SEIN (Sistema Eléctrico Interconectado Nacional) se realiza a través de la línea de transmisión en 220 kV-subestación Rubí-subestación Montalvo, con una longitud aproximada de 21,51 km (Andina, 2018).

### **Figura 23**

*Central Solar Rubí*



*Nota.* Fuente: (Andina, 2018).

En la siguiente tabla, se muestran las variables lingüísticas de entrada que se necesitan para poder determinar si este Proyecto fotovoltaico es viable o no.

**Tabla 8***Variables lingüísticas de entrada C.S Rubí*

<i>Variables</i>	<i>Valor</i>
<i>Radicación Solar (kWh/m<sup>2</sup> x Día)</i>	<i>5,3</i>
<i>Costo de la Tecnología (\$/W)</i>	<i>0.5</i>
<i>Costo de la Operación y Mantenimiento (\$/kWh)</i>	<i>10</i>
<i>Costo del Terreno (\$/m<sup>2</sup>)</i>	<i>0,52</i>
<i>Costo del Petróleo (\$/Barril)</i>	<i>96</i>

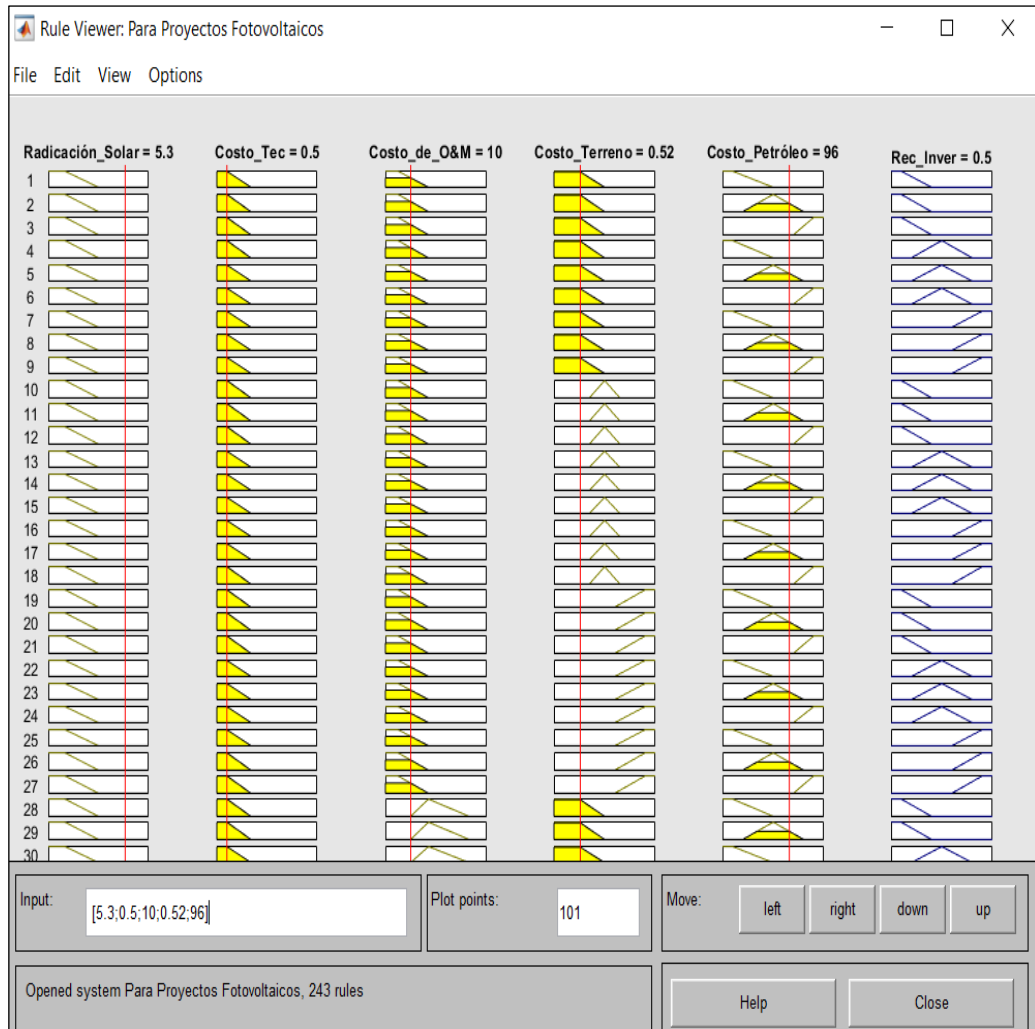
Fuente: Elaboración propia



En la siguiente figura, se muestra el ingreso de los valores de las variables lingüísticas de entrada de la C.S Moquegua FV.

**Figura 24**

*Aplicación de las reglas de la C.S Rubí*

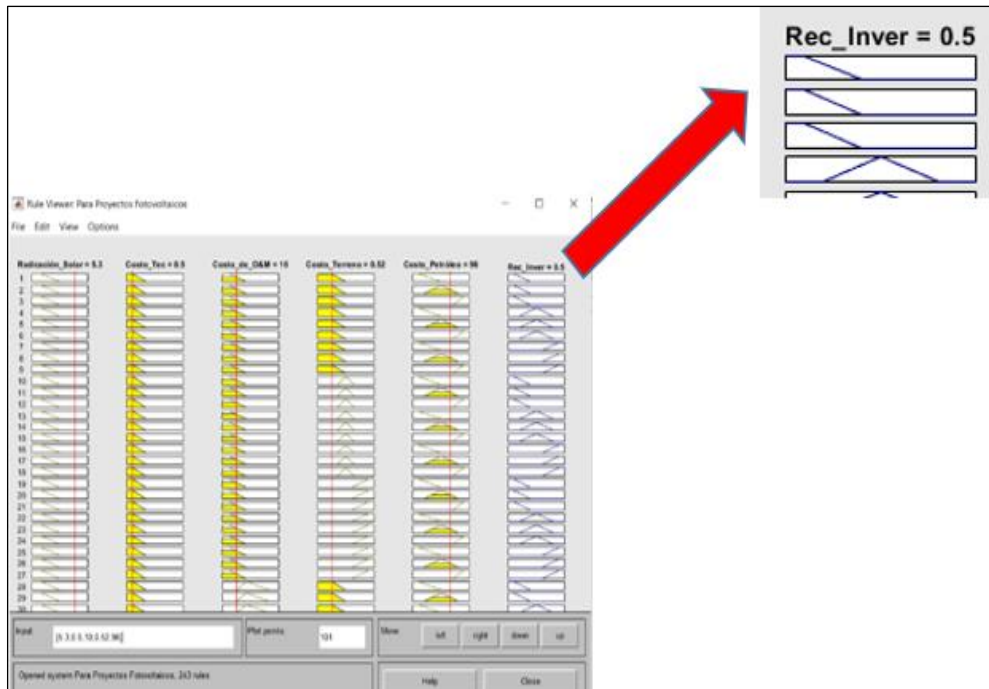


Fuente: Elaboración propia

En la siguiente figura, se muestra el valor de 0,5, obtenido de las variables lingüísticas de entrada definidas, el cual representa una recomendación de inversión del tipo media, motivo por el cual este proyecto fotovoltaico es de carácter viable.

## Figura 25

*Resultado de la aplicación de las reglas de la C.S Rubí*



Fuente: Elaboración propia.

# CAPÍTULO IV

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tesis de Román (2018), se manifiesta que la utilización de un sistema de inferencia difuso (FIS), mediante la lógica difusa, puede facilitar el proceso de toma de decisiones en la realización de proyectos solares fotovoltaicos. La lógica difusa es una herramienta útil para tomar decisiones y conocer si un proyecto fotovoltaico es factible. El presente trabajo de investigación coincide con lo concluido en la referida tesis, debido a que, mediante la lógica difusa, las variables de entrada (Radiación solar, costo de tecnología, costo de operación y mantenimiento, costo de terreno y costo de petróleo) y la determinación de sus valores (bajo, medio y alto), se pudo determinar que los proyectos fotovoltaicos (C.S Moquegua FV y C.S Rubí), los cuales formaron parte de la muestra, son de carácter viable para las condiciones establecidas en el Perú.

En el artículo científico de Suganthi, Iniyan y Samuel (2015), se manifiesta que la revisión destaca claramente que existe un amplio margen para la investigación en modelos basados en difusos en sistemas de energía renovable. Los investigadores pueden adoptar modelos basados en difusos para enriquecer su investigación y llegar a soluciones pragmáticas que resuelvan la preocupación por la energía y el medio ambiente. El presente trabajo de investigación coincide con este artículo científico, debido a que el modelo difuso aplicado ha permitido determinar que los proyectos fotovoltaicos (C.S Moquegua FV y C.S Rubí) son viables en nuestro país; así mismo este mismo modelo difuso servirá para poder determinar si los proyectos fotovoltaicos a desarrollarse en nuestro país más adelante pueden ser viables o no.

# CAPÍTULO V

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

La investigación de las variables lingüísticas de entrada, a través de una bibliografía extensa, permitió determinar el rango de los valores numéricos que fueron ingresados al software Matlab y su kit de lógica difusa.

Este trabajo de investigación aporta un sistema de inferencia difuso (FIS) para la toma de decisiones de nuestras autoridades gubernamentales, en la generación de proyectos fotovoltaicos en el Perú, con la finalidad de determinar si éstos son viables o no.

Se ha mostrado la utilidad y se ha validado dos proyectos fotovoltaicos (C.S Moquegua FV y C.S Rubí) reales, a través del uso de un sistema de inferencia difuso (FIS).

## 5.2 Recomendaciones

Teniendo en cuenta que, en el Perú, solo se cuenta con aproximadamente el 2,25% de energía proveniente de las centrales solares o fotovoltaicas, es necesario una política de gobierno de generación de energía renovable, con la finalidad de luchar con el cambio climático y evitar la contaminación del aire en favor de la salud. Uno de los métodos para evaluar los proyectos de energía solar renovable, que permita determinar si su inversión es confiable (viable) o no, es a través del sistema de inferencia difuso (FIS), basado en la lógica difusa (Toolbox Fuzzy) del software Matlab.

Continuar con la utilización de sistemas de inferencia difusos (FIS) de lógica difusa, que permitan facilitar la toma de decisiones en la construcción de nuevos proyectos fotovoltaicos.

# CAPÍTULO VI

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y VIRTUALES

Alarcón, I., Lugo, D., & Maldonado, R. (2011). *Control de un Péndulo Invertido utilizando Lógica Difusa [Maestría de Pregrado, Instituto Politécnico Nacional]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/10568/66.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Alba, E. (2019). *Modelado y Sintonización de un Control PID de un Robot tipo Puma de Tres Grados de Libertad utilizando Lógica Difusa [Tesis de Maestría, Universidad Nacional del Callao]*. Repositorio Institucional. Obtenido de [http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/3518/Alba%20Mejia\\_TESIS\\_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/3518/Alba%20Mejia_TESIS_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Andina. (Marzo de 2018). Conoce la planta de energía solar fotovoltaica Rubí, la más grande del Perú. Obtenido de <https://andina.pe/Agencia/noticia-conoce-planta-energia-solar-fotovoltaica-rubi-mas-grande-del-peru-703799.aspx>

Aracil, J., & Gordillo, F. (1995). *Dinámica de Sistemas*. Alianza Editorial. Obtenido de <http://tiesmexico.cals.cornell.edu/courses/shortcourse5/minisite/pdf/Literatura/Aracil%20Gordillo%20DS.pdf>

BBVA. (24 de noviembre de 2022). *¿Qué es el combustible fósil? La energía que se obtiene de la materia orgánica*. Obtenido de energía Fósil: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-el-combustible-fosil-la-energia-que-se-obtiene-de-la-materia-organica/>

Birol, F. (13 de Octubre de 2020). *La energía solar se convertirá en el 'nueva reina' de los mercados eléctricos mundiales*. Obtenido de

<https://www.aa.com.tr/es/econom%C3%ADa/la-energ%C3%ADa-solar-se-convertir%C3%A1-en-el-nueva-reina-de-los-mercados-el%C3%A9ctricos-mundiales/2005152>

Blancas, J. (27 de Octubre de 2019). *Lógica difusa en sistemas sistemas de energía fotovoltaica*. Obtenido de <https://energeticalabs.com/logica-difusa-en-sistemas-de-energia-fotovoltaica/>

Cabal, S. (2014). *Guía de buenas prácticas Proyectos Fotovoltaicos*. Managua, Nicaragua. Obtenido de <https://www.sica.int/download/?89647>

Caballero, A. (2023). Energía solar fotovoltaica y térmica: ventajas y desventajas. *Climate Consulting*.

Cabrera, A., Ortiz, F., & Cruz, F. (2019). Un Modelo de Minimización de Costos de Mantenimiento de Equipo Médico Mediante Lógica Difusa. *Nueva Época*, 14(3). Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmef/v14n3/2448-6795-rmef-14-03-379.pdf>

Chicaguala, M. (2017). *Análisis Técnico Económico Proyecto Fotovoltaico para Autoconsumo de un Datacenter [Tesis de Pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María*. Repositorio Institucional, Chile. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11673/22518>

CNE. (2020). Informe de costos de tecnologías de generación. *Informe anual*. Obtenido de <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2020/03/ICTG-Marzo-2020.pdf>

Consultores, M. (2021). Estudio Técnico y Económico para la determinación de las Tarifas en Barra Mayo 2022 – Abril 2023.

Cordero, P. (2019). *Modelado y Simulación de un robot Manipulador de 3 GLD para el Control de la Trayectoria Mediante Inteligencia Artificial [Tesis de*

Pregrado, Universidad del Azuay]. Repositorio Institucional, Ecuador. Obtenido de <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/8705/2/14364.pdf>

Dammert, A., Javier, J., & Bautista, L. (2018). *El Potencial de las Energías Renovables en el Perú*. Universidad San Martín de Porres. Obtenido de [https://aeden.es/wp-content/uploads/2019/04/DAMMERT-Alfredo\\_Potencial-Energias-Renovables-en-Peru-VF-02\\_-OCTUBRE-2018.pdf](https://aeden.es/wp-content/uploads/2019/04/DAMMERT-Alfredo_Potencial-Energias-Renovables-en-Peru-VF-02_-OCTUBRE-2018.pdf)

EnergyNews. (2020). Los grandes recursos eólicos, solares y geotérmicos de Perú.

Factorenergia. (15 de mayo de 2023). *Energía solar: todo lo que tienes que saber*. Obtenido de Factorenergia: <https://www.factorenergia.com/es/blog/autoconsumo-electrico/energia-solar/>

Farfan, J. (2024). Valores límites de la función de membresía.

Fresco, P. (Enero de 01 de 2021). *La nueva era de la transición energética: bienvenidos al futuro*. Obtenido de [https://www.elconfidencial.com/medioambiente/energia/2021-01-20/energia-crisis-climatica-transicion-futuro\\_2913567/](https://www.elconfidencial.com/medioambiente/energia/2021-01-20/energia-crisis-climatica-transicion-futuro_2913567/)

Fresco, P. (2021). *La Nueva Era de la Transición Energética: Bienvenidos al Futuro*. Obtenido de [https://www.elconfidencial.com/medioambiente/energia/2021-01-20/energia-crisis-climatica-transicion-futuro\\_2913567/](https://www.elconfidencial.com/medioambiente/energia/2021-01-20/energia-crisis-climatica-transicion-futuro_2913567/)

Gálvez, J. (18 de Julio de 2021). *Gobierno de Transición deja una cartera de 15 proyectos RER con una inversión que supera los US\$ 1,300 millones*. Obtenido de <https://www.gob.pe/ru/institucion/minem/noticias/506862-gobierno-de-transicion-deja-una-cartera-de-15-proyectos-rer-con-una-inversion-que-supera-los-us-1-300-millones>



García, L., Arias, R., & Ávalos, J. (2017). Estimación de la Radiación Solar para Estudios de Factibilidad de Sistemas Fotovoltaicos. *Convención Científica Intrenacional 2017 Universidad Nacional Maria Abreu de Las Villas*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/profile/Julio-J-Avalos-Garcia/publication/340296147\\_Estimacion\\_de\\_Radiacion\\_Solar\\_para\\_estudios\\_de\\_factibilidad\\_de\\_sistemas\\_fotovoltaicos\\_Solar\\_Radiation\\_Estimatio\\_n\\_for\\_feasibility\\_studies\\_of\\_photovoltaic\\_systems/links/5e82b80](https://www.researchgate.net/profile/Julio-J-Avalos-Garcia/publication/340296147_Estimacion_de_Radiacion_Solar_para_estudios_de_factibilidad_de_sistemas_fotovoltaicos_Solar_Radiation_Estimatio_n_for_feasibility_studies_of_photovoltaic_systems/links/5e82b80)

Gestión. (04 de Julio de 2019). Perú es el quinto país más atractivo de América Latina para invertir en energías renovables.

IICA. (2015). *Guía Metodológica: Uso y Acceso a las Energías Renovables en los Territorios Rurales*. Costa Rica. Obtenido de <http://repiica.iica.int/B3661e/B3661e.pdf>

Infraestructura Peruana. (Noviembre de 2015). Central solar Fotovoltaica Solar Moquegua FV. Obtenido de <https://infraestructuraperuana.blogspot.com/2015/11/central-electrica-solar-fotovoltaica.html>

International Energy Agency, I. (2020). World Energy Outlook 2020. *OECDilibrary*. Obtenido de [https://www.oecd-ilibrary.org/energy/world-energy-outlook-2020\\_557a761b-en](https://www.oecd-ilibrary.org/energy/world-energy-outlook-2020_557a761b-en)

Ledesma, J. (2011). *Gestión inteligente de fuentes de energía alternativa mediante un sistema basado en lógica difusa*[Tesis de maestría, Universidad del norte]. Repositorio institucional. Obtenido de <https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/8635>

Leoti, W., & Mollo, N. (2016). Construção de Algoritmo Fuzzy para Rastreamento Solar com Painel Fotovoltaico Montado em Suporte de um Eixo. *Enciclopédia Biosfera*. Obtenido de

<http://www.conhecer.org.br/enciclop/2016b/engenharias/construcao%20de%20algoritimo.pdf>

Llamas, J. (09 de Febrero de 2023). *Matlab*. Obtenido de Economipedia: <https://economipedia.com/definiciones/tecnologia/matlab.html>

Mateus, A. (2021). *Modelo en Matlab Simulink para un Sistema de Acumulación de Hidrógeno para sistemas Fotovoltaicos Autónomos [Tesis de Pregrado, Universidad Autónoma de Bucaramanga]*. Repositorio Institucional, Colombia. Obtenido de [https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/14055/2021\\_Tesis\\_Andres\\_Mauricio\\_Mateus\\_Rueda.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/14055/2021_Tesis_Andres_Mauricio_Mateus_Rueda.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Minem. (14 de Septiembre de 2021). Perú: radiación solar más alta de todo el planeta.

Montalvo, P. (2017). *Diseño de un Sistema de Control Difuso de Seguimiento Solar de Dos Ejes [Tesis de Maestría, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]*. Repositorio Institucional, Ecuador. Obtenido de <http://dspace.espe.edu.ec/bitstream/123456789/7331/1/20T00886.pdf>

Negro, I. (2020). *Análisis comparativo de las tecnologías de producción de energía eléctrica: Costes de inversión, Operación y Mantenimiento, de producción y emisiones específicas [Tesis de Grado, Universidad de Sevilla]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/101319/TFG-2846-NEGRO%20TORRES.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Nehuén, T. (2023). Radiación Solar. Obtenido de <https://definicion.de/radiacion-solar/>

Obstfeld, M., Milesi-Ferreti, G., & Arezki, R. (24 de Marzo de 2016). *Los precios del petróleo y la economía mundial: Una relación complicada*. Obtenido de

<https://www.imf.org/es/Blogs/Articles/2016/03/24/oil-prices-and-the-global-economy-its-complicated>

Osinermin. (Noviembre de 2019). Energías renovables experiencia y perspectivas en la ruta del Perú hacia la transición energética. Obtenido de [https://www.osinermin.gob.pe/seccion/centro\\_documental/Institucional/Estudios\\_Economicos/Libros/Osinermin-Energias-Renovables-Experiencia-Perspectivas.pdf](https://www.osinermin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Libros/Osinermin-Energias-Renovables-Experiencia-Perspectivas.pdf)

Osinermin. (2020). *Reporte de Análisis Económico Sectorial "Sector Electricidad"*.

Osinermin. (4 de Febrero de 2021). *Radiografía Energética: PERÚ 2021*. Obtenido de <https://issuu.com/osinermin/docs/infografia-energetica-2021>

Pendón, M., Williams, E., Cibeira, N., Couselo, R., Crespi, G., & Tittone, M. (2017). Energía Renovable en Argentina: Cambio de Paradigma y Oportunidades para su Desarrollo. *4° Jornadas ITE-2017-Facultad de Ingeniería-Universidad Nacional de la Plata*. Obtenido de [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/60384/Documento\\_completo.pdf?sequence=1](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/60384/Documento_completo.pdf?sequence=1)

Pinho, J., & Galdino, M. (2014). *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/265851263\\_Manual\\_de\\_Engenharia\\_para\\_Sistemas\\_Fotovoltaicos/citation/download](https://www.researchgate.net/publication/265851263_Manual_de_Engenharia_para_Sistemas_Fotovoltaicos/citation/download)

Posselt, E., Molz, R., & Horn, F. (Octubre de 2009). Uso de Lógica Fuzzy para a Otimização de Sistemas Energéticos baseados em Energia Limpa. *A Engenharia de Produção e o Desenvolvimento Sustentável: Integrando Tecnologia e Gestão*. Obtenido de [http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2009\\_TN\\_STO\\_099\\_666\\_13336.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2009_TN_STO_099_666_13336.pdf)

- PUCP. (2017). *El desarrollo de la energía solar en el Perú*. Obtenido de <https://gruporural.pucp.edu.pe/nota/el-desarrollo-de-la-energia-solar-en-el-peru/>
- Razo, J. (2019). *Desarrollo de Sistemas Expertos para diagnóstico en Micro Redes Eléctricas mediante Unidades de Monitoreo Fasorial Sincronizadas [Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Querétaro*. Repositorio Institucional, México. Obtenido de <http://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/1480/1/IG-0088-Jos%c3%a9%20Roberto%20Razo%20Hern%c3%a1ndez.pdf>
- Román, J. (2018). *Evaluación de proyectos fotovoltaicos usando lógica difusa [Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de Morelos]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <http://riaa.uaem.mx/xmlui/handle/20.500.12055/1406>
- Santoyo, E., Vargas, B., & Sanchez, J. (2015). Evaluación del deterioro presente en conductores de acero al carbón mediante un sistema inteligente. *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos*. Obtenido de <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/idata/article/view/12103/10829>
- Seuret, D., Nieto, J., Tecpoyotl, M., Ayala, F., & Román, J. (Marzo de 2016). Fuzzy logic for evaluation of renewable energy projects. *International journal of modern engineering research*, 6. Obtenido de [http://www.ijmer.com/papers/Vol6\\_Issue3/Verson-3/B6330413.pdf](http://www.ijmer.com/papers/Vol6_Issue3/Verson-3/B6330413.pdf)
- Simons, P. (2017). *La Energía en el 2040*. Obtenido de <https://blogs.iadb.org/energia/es/la-energia-en-el-2040/>
- Stocker, S., & Delabeneta, C. (2018). A produção Científica Brasileira Sobre Energia Solar. *Revista de Administração de Roraima*. Obtenido de <https://revista.ufrr.br/adminrr/article/view/5093/pdf>

- Stocker, T., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., . . . Midgley, P. (2013). *Climate Change 2013 The Physical Science Basis. Cambridge University Press*. Obtenido de [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/09/WG1AR5\\_Frontmatter\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/09/WG1AR5_Frontmatter_FINAL.pdf)
- Suganthi, L., Iniyar, S., & Samuel, A. (Agosto de 2015). Applications of fuzzy logic in renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211500307X>
- Vanegas, M., Villicaña, E., & Arrieta, L. (2015). Cuantificación y Caracterización de la Radiación Solar en el Departamento de La Guajira-Colombia mediante el Cálculo de Transmisibilidad Atmosférica. 13(2). Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/prosp/v13n2/v13n2a07.pdf>
- Vargas, A., Santa, T., Gonçalves, J., Marquez, A., & Pestana, E. (Octubre de 2019). Controlador MPPT baseado em Lógica Fuzzy Aplicado a um Sistema Fotovoltaico Conectado `a uma Rede. *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*. Obtenido de <https://proceedings.science/sbai-2019/papers/controlador-mppt-baseado-em-logica-fuzzy-aplicado-a-um-sistema-fotovoltaico-conectado-a-uma-rede>
- Zadeh, L. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control* 8. Obtenido de <https://pdf.sciencedirectassets.com/273276/1-s2.0-S0019995800X00952/1-s2.0-S001999586590241X/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEBYaCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCIQC%2FfybUNcSLfVK5FhjcZMPHtY8%2BU1Mlx8QHkvcdSboBPglgawfbvGC6LHdt8UI1QDHm4dHSFNAGfkcKxnpATn1D>

# CAPÍTULO VII

## ANEXOS

### ANEXO 01

#### VARIABLES DE ENTRADA Y LOS CRITERIOS CON SUS VALORES LÍMITES (CUESTIONARIO)

<b>Variables de entrada</b>	<b>Criterios</b>
Radiación Solar (kWh/m <sup>2</sup> x Día)	Radiación Solar: Baja < .....
	Radiación Solar: Media ..... a .....
	Radiación Solar: Alta > .....
Costo de la Tecnología (\$/W)	Costo de la Tecnología: Baja < .....
	Costo de la Tecnología: Media ..... a .....
	Costo de la Tecnología: Alta > .....
Costo de la Operación y Mantenimiento (\$/kWh)	Costo de la O&M: Baja < .....
	Costo de la O&M: Media ..... a .....
	Costo de la O&M: Alta > .....
Costo del Terreno (\$/m <sup>2</sup> )	Costo del Terreno: Baja < .....
	Costo del Terreno: Media ..... a .....
	Costo del Terreno: Alta > .....
Costo del Petróleo (\$/Barril)	Costo del Petróleo: Baja < .....
	Costo del Petróleo: Media ..... a .....
	Costo del Petróleo: Alta > .....